

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství
Katedra fyzikální chemie a teorie technologických pochodů

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Návrh chemicko-inženýrských úloh
Filtrace a Sušení

AUTOR PRÁCE:	Bc. Julie Kadurová
VEDOUCÍ PRÁCE:	Ing. Zuzana Mikulová, Ph.D.
KONZULTANT PRÁCE:	Ing. Kamila Kočí, Ph.D.

2010

VŠB – Technical university of Ostrava
Faculty of metalurgy and materials engineering
Department of physical chemistry and the theory of technological processes

THESIS

Proposal of chemical-engineering tasks
Filtration and Drying

AUTHOR:	Bc. Julie Kadurová
SUPERVISOR:	Ing. Zuzana Mikulová, Ph.D.
TUTOR:	Ing. Kamila Kočí, Ph.D.

2010

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Julie Kadurová**
Studijní program: N3909 Procesní inženýrství
Studijní obor: 2807T004 Chemické inženýrství
Téma: **Návrh chemicko-inženýrských úloh - Filtrace a Sušení**
Proposal of chemical-engineering tasks - filtration and drying

Zásady pro vypracování:

1. Základy teorie sušení a filtrace
2. Návrh laboratorní úlohy Filtrace na rámovém kalolisu
3. Návrh laboratorní úlohy Sušení v proudové sušárně
4. Experimentální měření při zvolených procesních parametrech
5. Zpracování a vyhodnocení naměřených dat ve formě vzorových protokolů

Seznam doporučené odborné literatury:

1. V. Míka a kol. Příklady a úlohy z chemického inženýrství I.a II. díl, vydavatelství VŠCHT Praha, 1997, ISBN 80-7080-305-3.
2. O.Holeček, Chemicko inženýrské tabulky, vydavatelství VŠCHT Praha, 2001, ISBN 80-7080-444-0.
3. M. Ludvík, Laboratorní cvičení z chemického inženýrství, vydavatelství VŠCHT Praha, 2000, ISBN 80-7080-404-1.
4. D. Šnita, Chemické inženýrství I. vydavatelství VŠCHT Praha, 2005, ISBN 80-7080-589-7.
5. R.H.Perry, D.W. Green, Perry's Chemical Engineers' Handbook, McGraw-Hill, 7. vydání, 1997, ISBN 0-07-115982-7.


Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Zuzana Mikulová, Ph.D.**

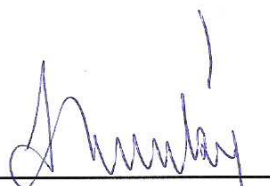
Konzultant diplomové práce: **Ing. Kamila Kočí, Ph.D.**

Datum zadání: 30.11.2009

Datum odevzdání: 30.04.2010


prof. Ing. Jana Dobrovská, CSc.
vedoucí katedry




prof. Ing. Ludovít Dobrovský, CSc., Dr.h.c.
děkan fakulty

Zásady pro vypracování diplomové práce

I.

Diplomovou prací (dále jen DP) se ověřují vědomosti a dovednosti, které student získal během studia, a jeho schopnosti využívat je při řešení teoretických i praktických problémů.

II.

Uspořádání diplomové práce:

- | | |
|--|------------------------------|
| 1. Titulní list + zásady pro vypracování DP | 5. Textová část DP |
| 2. Prohlášení + místopřísežné prohlášení | 6. Seznam použité literatury |
| 3. Abstrakt + klíčová slova česky a anglicky | 7. Přílohy |
| 4. Obsah DP | |

ad 1) Titulním listem je originál zadání DP, který student obdrží na své oborové katedře. Za titulním listem následují tyto „Zásady pro vypracování diplomové práce“.

ad 2) Prohlášení + místopřísežné prohlášení napsané na zvláštním listě (student jej obdrží na své oborové katedře) a vlastnoručně podepsané studentem s uvedením data odevzdání DP. *V případě, že DP vychází ze spolupráce s jinými právníckými a fyzickými osobami a obsahuje citlivé údaje, je na zvláštním listě vloženo prohlášení spolupracující právnícké nebo fyzické osoby o souhlasu se zveřejněním DP.*

ad 3) Abstrakt a klíčová slova jsou uvedena na zvláštním listě česky a anglicky v rozsahu max. 1 strany pro obě jazykové verze.

ad 4) Obsah DP se uvádí na zvláštním listě. Zahnuje názvy všech očíslovaných kapitol, podkapitol a statí textové části DP, odkaz na seznam příloh a seznam použité literatury, s uvedením příslušné stránky. Předpokládá se desetinné číslování.

ad 5)

Textová část DP obvykle zahrnuje:

- Úvod, obsahující charakteristiku řešeného problému a cíle jeho řešení v souladu se zadáním DP;
- Vlastní rozpracování DP (včetně obrázků, tabulek, výpočtů) s dílčími závěry, vhodně členěné do kapitol a podkapitol podle povahy problému;
- Závěr, obsahující celkové hodnocení výsledků DP z hlediska stanoveného zadání.

DP bude zpracována v rozsahu min. 45 stran (včetně obsahu a seznamu použité literatury). Text musí být napsán vhodným textovým editorem počítače po jedné straně bílého nelesklého papíru formátu A4 při respektování následující **doporučené** úpravy - písmo Times New Roman (nebo podobné) 12b; řádkování 1,5; okraje – horní, dolní – 2,5 cm, levý – 3 cm, pravý 2 cm. Fotografie, schémata, obrázky, tabulky musí být očíslovány a musí na ně být v textu poukázáno. Budou zařazeny průběžně v textu, pouze je-li to nezbytně nutné, jako přílohy (viz ad 7).

Odborná terminologie práce musí odpovídat platným normám. Všechny výpočty musí být přehledně uspořádány tak, aby každý odborník byl schopen přezkoušet jejich správnost. U

vzorců, údajů a hodnot převzatých z odborné literatury nebo z praxe musí být uveden jejich pramen - u literatury citován číselným odkazem (v hranatých závorkách) na seznam použité literatury.

Nedostatky ve způsobu vyjadřování, nedostatky gramatické, neopravené chyby v textu mohou snížit klasifikaci práce.

- ad 6) DP bude obsahovat alespoň 15 literárních odkazů, z toho nejméně 5 v některém ze světových jazyků.

Seznam použité literatury se píše na zvláštním listě. **Citaci literatury je nutno uvádět důsledně v souladu s ČSN ISO 690.** Na práce uvedené v seznamu použité literatury musí být uveden odkaz v textu DP.

- ad 7) Přílohy budou obsahovat jen ty části (speciální výpočty, zdrojové texty programů aj.), které nelze vhodně včlenit do vlastní textové části např. z důvodu ztráty srozumitelnosti.

III.

Diplomovou práci student odevzdá ve dvou knihařsky svázaných vyhotoveních, pokud katedra garantující studijní obor neurčí jiný počet. Vnější desky budou označeny takto:

nahoře: *Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava*
Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství
Katedra

uprostřed: *DIPLOMOVÁ PRÁCE*

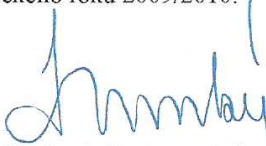
dole: *Rok* *Jméno a příjmení*

Kromě těchto dvou knihařsky svázaných výtisků odevzdá student kompletní práci také v elektronické formě do IS EDISON včetně abstraktu a klíčových slov v češtině a angličtině.

IV.

Diplomová práce, která neodpovídá těmto zásadám, nemůže být přijata k obhajobě. Tyto zásady jsou závazné pro studenty všech studijních programů a forem magisterského, resp. navazujícího magisterského studia fakulty metalurgie a materiálového inženýrství Vysoké školy báňské – Technické univerzity Ostrava od akademického roku 2009/2010.

Ostrava 30. 11. 2009


Prof. Ing. Ludovít Dobrovský, CSc., Dr.h.c.
děkan fakulty metalurgie a materiálového inženýrství
VŠB-TU Ostrava

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- jsem byl(a) seznámen(a) s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. - autorský zákon, zejména §35 - užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního (§60 - školní dílo);
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB - TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§35 odst. 3);
- souhlasím s tím, že diplomová práce bude archivována v elektronické formě v databázi Ústřední knihovny VŠB - TUO a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o diplomové práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO;
- bylo sjednáno, že s VŠB - TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu §12 odst. 4 autorského zákona;
- bylo sjednáno, že užít své dílo - diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB - TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB - TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že odevzdáním své diplomové práce souhlasím s jejím zveřejněním podle zákona č. 111/1998Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (Zákon o vysokých školách) bez ohledu na výsledek její obhajoby.

Místopřísežně prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci vypracoval(a) samostatně.

V Ostravě ... 20.04.2010...

... *Julie Radová*
přímý podpis (jméno a příjmení studenta)



Poděkování

Děkuji vedoucí své diplomové práce Ing. Zuzaně Mikulové, Ph.D. a rovněž konzultantce Ing. Kamile Kočí, Ph.D. za jejich trpělivost a poskytnutí mi cenných rad, připomínek i odborné pomoci při vypracování této diplomové práce.

V neposlední řadě bych chtěla poděkovat svým rodičům za jejich neustálou podporu a lásku.



*Ludí treba naučiť
správne jest',
správne pracovať
a
správne odpočívať.*

Ivan Petrovič Pavlov, fyziolog

CAUSA LATET, VIS EST NOTISSIMA.
Příčina je skryta, výsledek je všeobecně známý.

Publius Ovidius Naso



Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá optimalizací procesních podmínek na modelových čtyřprovozních stanicích sušení a filtrace, které budou sloužit pro výuku laboratoří z předmětu Procesní inženýrství.

Pro proces sušení byl vybrán jako neoptimálnější pevný materiál - písek s relativním hmotnostním zlomkem vody 0,11 a procesní podmínky sušení: průtok sušicího vzduchu $140 \text{ m}^3/\text{s}$ a teplota ohřevu vzduchu v kaloriferu 85°C .

Pro proces filtrace byla jako neoptimálnější vybrána suspenze o objemu 100 l. Suspenze byla připravena ze suché plavené křídý o hmotnosti 3 kg a doplněna na 100 l vodou. Filtrace probíhala na kalolisu a experimentálně bylo zjištěno, že nejvhodnější počet filtračních desek je šest.

Všechna naměřená data byla vyhodnocena a zpracována do tabulek. Zároveň byl vypracován k oběma částem diplomové práce (k sušení a filtraci) vzorový laboratorní protokol.

Klíčová slova

filtrace, sušení, procesní inženýrství, laboratorní protokol.

Abstrakt

This thesis deals with the optimalization of process conditions on the model four-operational stations drying and filtration, which will serve for teaching the laboratory course of Process engineering.

For the drying process was chosen as the optimum material – pevný sand with a relative mass fraction of water 0,11 and drying process conditions: flow the drying air $140 \text{ m}^3/\text{s}$ and temperature of heating in heaters 85°C .

For the drying process was selected as the optimum volume of the suspension 100 l. Suspension was prepared from the weight 3 kg dry of the whitening and supplemented per 100 liter of water. Filtration took place at the filter press and by experimental was found that the optimal number of filter plates is six. All measured values were evaluated and processed into tables. Also been developed for both parts of the thesis (for drying and filtration) standard laboratory protocol.

Keywords

Filtration, drying, Process engineering, laboratory protocol

OBSAH

1 Úvod	2
2.1 Teoretická část - Sušení	5
2.1.1 Proces sušení	5
2.1.2 Klasifikace sušících metod a zařízení	6
2.1.3 Vlastnosti vlhkého vzduchu – Fyzikální vlastnosti	16
2.1.4 Veličiny charakterizující vlhký vzduch	16
2.1.5 Vlastnosti sušeného materiálu	20
2.1.6 Kinetika periodického konvekčního sušení	20
2.1.7 Charakteristika sušárny	23
2.2 Teoretická část – Filtrace	25
2.2.1 Proces mechanické separace	25
2.2.2 Proces filtrace	25
2.2.3 Koláčové filtry – vsádkové	27
2.2.4 Koláčové filtry – kontinuální	30
2.2.5 Filtrační lis – kalolis	31
2.2.6 Typy kalolisů	32
2.2.7 Konstrukční provedení kalolisu	32
2.2.8 Charakteristika koláčové filtrace	33
2.2.9 Kinetika koláčové filtrace	36
3.1 Experimentální část – Sušení	39
3.1.1 Popis laboratorní sušárny	39
3.1.2 Optimalizace pracovních podmínek a postup práce	41
3.1.3 Zpracování naměřených hodnot	44
3.2 Experimentální část – Filtrace	51
3.2.1 Popis laboratorního filtračního zařízení	51
3.2.2 Průběh filtrace na kalolisu	53
3.2.3 Zpracování naměřených hodnot	56
4 Závěr	62
5 Seznam citované literatury	64
6 Seznam použitých zkratk	68
7 Seznam použitých symbolů	68
8 Seznam obrázků	70
9 Seznam tabulek	71
10 Seznam grafů	71
11 Přílohy	72

1 ÚVOD

Samotná fyzická existence lidského tvora je od pradávna podmíněna především příjmem potravy. Sehnání obživy nebylo vždy snadné a mnohdy ani dnes v rozvojových zemích tomu tak není, nemusí to být jen díky neúrodné půdě, podnebí či špatným povětrnostním podmínkám, ale i tím jak člověk s úrodnou půdou a samotnou potravou zachází, zda je schopný ji uchránit před přirozenými rozkladnými procesy, zabránit vegetaci mikrobů, tvorby enzymů (oxydáz). Moderní civilizace a rychlý způsob života si vynutil vývoj záměrného uskládování potravin po dobu co nejdelší ve stavu nejen požitelném, ale i lahodícím oku a určeném k další snadné spotřebě nebo uskladnění. Tímto způsobem lze na určitou dobu zachovat v potravinách, jak potřebné živiny, tak i nutriční hodnoty, jež jsou zdrojem všech důležitých životních pochodů, mající vliv na tělesné výkony, správnou činnost organismu a na zdraví, tzn. na tvorbu pro organismus nezaměnitelných látek.

Jedním z mnoha typů takového zpracování pokrmů je sušení, čímž rozumíme převedení vody z potravin do plynného stavu. Musíme mít, však na zřeteli, že sušením požívatin dochází ke ztrátám obsahu vitamínů, k nevratné změně barvy a mnohdy i chuti. Často tedy bývá před sušením zařazeno povaření nebo zmrazení. Po zmrazení se tekutina odstraní sublimací. Zákroky vůči enzymům můžeme jmenovat jako šíření v komorách, noření do roztoků, blanšírování, procukřování či osmotické předsušení [1]. Na dnešním rozmanitém trhu lze nalézt potraviny, jež prošly procesem sušení, například sušené maso (požívají např. horolezci), prosciutto (Parmská šunka), těstoviny, zelenina a ovoce, koření, houby nebo v neposlední řadě rozeznáváme již hotové sušené výrobky, které postačí zalít horkou vodou a jsou v práškovité konzistenci, vyrobené odpařením stanoveného množství vody - sušené mléko (Sunar), vaječný prášek (získává se sušením vaječného bílku, žloutku a někdy i s částí skořápky), polévky v sáčku, granulované čaje, další speciální prášky k tomu určené, jako pudink, droždí, atd.).

Proces sušení často navazuje na odstraňování vlhkosti z materiálu filtrací, usazováním, odstředováním, lisováním nebo krystalizací. Tyto procesy zbavují vlhkosti pevné látky, ale lze sušit také plyny či kapaliny, a to například vymrazováním, absorpcí (vysušování pomocí CaCl_2 , MgCl_2 , což jsou hygroskopické látky, schopné vázat vlhkost), rovněž i adsorpcí (na silikagelu, zeolitech, aktivním uhlí).

Pro rozmanitost vlastností sušených materiálů, typů sušáren lišících se konstrukčně a funkčně, nelze vytvořit ucelenou teorii sušení a vybudovat jednotný výpočtový postup k navrhování sušáren, a proto je nutné proces sušení na daném materiálu studovat zvlášť a dle

toho i navrhnout příslušné parametry daných sušáren.

V případě filtrace je běžnou praxí ze suspenzí získávat a dále zpracovávat buď co nejvíce čistého filtrátu, nebo naopak tuhý koláč, zbavený veškeré vlhkosti. Důležitými parametry pro navrhování zařízení je nejen kvalita výsledných produktů (filtrát či koláč), ale také celková časová náročnost filtrace a velká filtrační plocha připadající na jednotkový objem aparátu při zachování malé zastavěné plochy v budově, to vše hospodárně a bezpečně. Musí být splněna řada podmínek, vycházejících z laboratorních výzkumů a chemický inženýr je aplikuje a navolí tak, aby byly vhodné pro sestavení a správný chod průmyslového zařízení v provozu.

Z výše zmíněných důvodů se ve své diplomové práci budu v první části zabývat studiem kinetiky sušení vybraného pevného materiálu s určitým objemem vody a ve druhé části studiem kinetiky filtrace na kalolisu. Pomocí rovnic založených na zákoně zachování hmotnosti a energie a rovnic popisujících rychlost děje se stanoví parametry a vlastnosti dějů, vzniklých produktů, v případě sušení i spotřeba energie a účinnost zařízení. Experimentální měření se provedou pro několik zvolených pracovních podmínek a všechny naměřené hodnoty se vyhodnotí a zpracují do souhrnných tabulek. Nejlépe vyhovující měření se několikrát zopakuje, aby mohla být vypočtena chyba vznikající při měření. A z těchto opakovaných experimentů se vybere jeden pro vypracování ukázkového laboratorního protokolu.

Cílem této diplomové práce je optimalizovat procesní podmínky, proces sušení a filtrace na modelových výukových stanicích a následně navrhnout vhodné modelové úlohy pro laboratorní cvičení z předmětu Procesního inženýrství, k názornému pochopení probírané látky.

V rámci mé diplomové práce budou studovány a vyhodnocovány následující cíle:

Sušení

1. Bilance hmotnosti mokrého materiálu při procesu sušení.
2. Grafické znázornění křivky sušení, tj. závislosti $X_A = f(\tau)$. Vymezení I. období sušení a zjištění kritické vlhkosti X_{AC} .
3. Sestrojení křivky rychlosti sušení (za celé období sušení), tj. závislosti $\Phi_A = f(X_A)$ s vyznačením kritické vlhkosti.
4. Výpočet a porovnání součinitelů přestupu tepla a hmoty v I. období sušení.
5. Stanovení měrné spotřeby sušícího vzduchu.
6. Stanovení spotřeby tepla v I. období sušení.
7. Zjištění tepelné účinnosti sušárny v I. období sušení (teoretické i praktické účinnosti).

Filtrace

1. Sestavit hmotnostní bilanci pokusné filtrace.
2. Vypočítat celkové ztráty a ztráty pevné látky z bilancí.
3. Stanovit konstanty filtrační rovnice a jejich intervalové odhady z naměřených dat.
4. Sestrojit graf dle rovnice filtrace, kde nezávisle proměnná bude q_F a závislá proměnná τ_F .
5. Zjistit vlhkost filtračního koláče.
6. Vypočítat měrný odpor koláče při konstantním tlakovém rozdílu.

2.1 TEORETICKÁ ČÁST - Sušení

2.1.1 Proces sušení

Sušení je tepelný způsob odstraňování vlhkosti ze sušeného materiálu. Je to energeticky velmi náročný proces, neboť je potřeba sušenému materiálu dodávat velké množství energie na změnu skupenství kapaliny obsažené v materiálu a k jejímu následnému odpařování.

V pevných látkách může být kapalina vázaná chemicky či fyzikálně jako:

- a) povrchová vlhkost tvořená vrstvou kapaliny na povrchu nebo v širokých pórech pevného materiálu, tzv. *volná vlhkost*,
- b) *kapilární vlhkost* držena kapilárními silami v úzkých pórech tuhého materiálu a na povrchu částic materiálu,
- c) *adsorpčně vázaná vlhkost* uvnitř pórů pevné látky, tyto póry se mohou vyskytovat v nanometrických vrstvách na vnějším i vnitřním povrchu pevného materiálu,
- d) *absorpčně rozpuštěná vlhkost* uvnitř materiálu, kde může být vázána v krystalických mřížkách,
- e) uzavřená vlhkost v polopropustných membránách jako *osmotický elektrolyt*,
- f) vlhkost spjatá s pevnou látkou *chemickými vazbami* [2].

V praxi je velmi časté odpařování vody (složka A) z pevné látky (složka C) do proudu přehřátého vzduchu (složka B). Během tohoto děje dochází ke sdílení tepla a hmoty mezi dvěma fázemi. První fází je v tomto případě *pára* (tj. fáze s menší hustotou; vlhkost charakterizována relativním hmotnostním zlomkem Y_A) a druhou fází je mokrý materiál (tzv. fáze s větší hustotou; vlhkost charakterizována relativním hmotnostním zlomkem X_A). Obě fáze se navzájem dotýkají na mezifázovém rozhraní, kde v důsledku koncentračního rozdílu probíhá transport látky z první fáze do druhé fáze, tzv. prostup hmoty, jenž zahrnuje současné sdílení hmoty v obou navzájem dotýkajících se fázích. Vloží-li se vlhký materiál do prostředí vlhkého vzduchu, kde je tenze par menší než na povrchu materiálu (lépe na fázovém rozhraní, kde je dle filmové teorie difúzních procesů parciální tlak rovnovážný [3]), dochází ke sdílení hmoty mezi fázovým rozhraním a proudícím vzduchem. Volná vlhkost tedy přechází z povrchu materiálu do proudu vzduchu a sušení je tím chápáno jako vnější difúzní proces [4]. Sušící médium, v němž je daný materiál uložen, by měl mít konstantní parametry (teplota a relativní vlhkost, rychlost proudění), které ovlivňují rychlost vnější difúze.

Tuhý materiál se za uvedených podmínek vysouší proto, neboť množství složky difundující z vlhkého materiálu přejde beze zbytku do složky B, odkud se odvádí [3] a na

fázovém rozhraní se ustaví fázová rovnováha (sdílení hmoty nesmí být příliš vysoké a nemělo by docházet k chemické reakci) [4].

Sušený materiál je v převážné části strukturně porézní povahy s jistým množstvím kapaliny. Pokud by při styku tuhého materiálu se vzduchem byl parciální tlak vodní páry ve vzduchu vyšší než na fázovém rozhraní, dojde k adsorpci, tzn. proběhne transport vodní páry opačným směrem než při sušení a vlhkost tuhého materiálu se zvýší [3].

Po jisté době sušení, kdy je již odstraněna *volná vlhkost* z povrchu materiálu, dochází k vnitřní difúzi, tzn. že vlhkost přechází z pórů, umístěných uvnitř tuhé látky, k mezifázovému rozhraní. Rychlost sušení je ovlivňována vlastnostmi sušeného materiálu [3].

Dosáhne-li tento sušený materiál rovnovážné měrné vlhkosti, kdy parciální tlak vodní páry je právě tak velký jako na fázovém rozhraní s okolním prostředím, tehdy již k látkové ani tepelné výměně nedochází. Proces sušení se zastavuje a jeho hnací síla je nulová [3].

Ke sdílení tepla dochází konvekcí ze vzduchu do sušeného materiálu a rychlost sušení je poté určována množstvím přiváděného tepla a rychlostí odvodu vlhkého vzduchu. Celková rychlost sušení je určována pomalejším dějem [3].

2.1.2 Klasifikace sušících metod a zařízení

Snaha zdokonalovat sušení vlhkých materiálů vedla k navržení různých typů sušících zařízení (sušáren), lišících se navzájem svou konstrukcí, ale i způsobem práce.

Rozdělení metod sušení může být:

- ❖ dle sušícího média (ohřátý vzduch, spaliny, přehřátá pára),
- ❖ dle typu a vlastností sušeného materiálu (např. pevné látky snášející vysoké teploty),
- ❖ dle způsobu provozu sušících zařízení (vsádkové, kontinuální),
- ❖ dle provozního tlaku v sušárně (vakuum, atmosférický tlak, přetlak),
- ❖ dle způsobu přívodu tepla a jeho sdílení (konvekcí, kontaktem, sáláním, aj.),
- ❖ dle uspořádání vzájemného pohybu sušeného materiálu a vzduchu.

Sušení se dále dělí na *přirozené* = na volném vzduchu nebo na Slunci, a na *umělé* = ve speciálních k tomu určených zařízeních.

V laboratorních sušárnách se pevný vlhký materiál suší převážně při teplotě 105° C, kdy z něj lze odstranit *volnou vlhkost* a *vlhkost vázanou* hygroskopicky. Tímto způsobem naopak nelze odstranit *krystalickou vodu* (odstraňuje se např. kalcinací), ani *vlhkost vázanou chemicky* (odstraňuje se chemickým procesem).

Následující tabulky 1 – 3 dokumentují principy sušení materiálů v různých druzích sušáren a jejich výhody a nevýhody.

Tabulka 1: Pohyb sušeného materiálu v sušárnách.

	Přetržitě pracující (periodicky)	Nepřetržitě pracující (kontinuální)
Způsob práce	Materiál se nepohybuje. Sušárna se jednorázově naplní, po dosažení požadované vlhkosti materiálu se vyprázdní a cyklus se obnoví. Výměna látky mezi fázemi je neustálený proces.	Vzduch i materiál se pohybují (ideální míšič, pístový tok). Výměna látky mezi fázemi má charakter ustáleného děje.
Nevýhody	Větší spotřeba tepla, nerovnoměrnost vysušení, jen pro malé množství materiálu, dodržování podmínek	Sušené materiály by neměly být citlivé na vysoké teploty. Pokud je zrnitost materiálu velmi malá hrozí unášení částic proudícím médiem.

Tabulka 2: Nepřetržité sušení – tok vzduchu.

Souproud	Protiproud	Zkřížený proud
pro materiál nesnášející vysoké teploty, při vstupu materiálu a vzduchu je velká hnací síla podél celé sušárny a při výstupu malá, vzduch odchází teplý a nevyužitý (pokud je počáteční rychlost sušení velká, dochází k prasknutí povrchu např. keramiky)	pro hlubší vysušení materiálu, pro materiál nesnášející prudké sušení (na počátku chladnější vzduch, aby se nepřipálil materiál, pomalé sušení)	pro materiál snášející vysoké teploty a prudké sušení

Tabulka 3: Druhy sušáren.

Způsob přívodu energie zvenčí	Konvekci	Kontaktem	Mikrovlnami, dielektrikem	Radiací	Vlastním teplem
Teplo se předává	z proudícího plynu	vedením z vyhřívané plochy	radiovými mikrovlnami (915 či 2450 MHz)	infračervenými vlnami (1 – 2 μm)	sublimací
Výhody	sušící médium je s materiálem v bezprostředním kontaktu	nízké tlaky, nižší teplota, vyšší rychlost sušení	pro látky s nesymetrickou molekulovou strukturou (dipól-momentem).	vhodné k dosušování materiálu	vhodné pro materiál citlivý na vysoké teploty
Doba sušení	3 – 48 hod	1 hodina	Několik minut až hodina.	Minuty	Několik sekund
Typ sušárny	skříňová, tunelová, fluidní, pásová, a jiné	válcová, lopatková, sublimační	mikrovlnná	infračervená	sublimační, lyofilizační - vakuové

Sušení volně na vzduchu

Sušení volně na vzduchu se řadí mezi *přirozené* sušení, provádí se v dobře větraném prostoru (neustálá cirkulace vzduchu) při teplotě místnosti. Tento proces sušení je pomalý, závisí na okolních podmínkách (teplota vzduchu, relativní vlhkost vzduchu, vlhkost a teplota sušeného materiálu). Volného sušení na vzduchu bylo použito např. v Národní knihovně pro sušení mokrých knih, kdy se do knih vkládal také savý papír k urychlení odchodu *volné* vody [5].

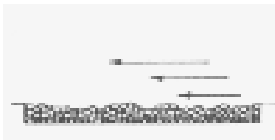
Nejběžnější a ekonomicky nejméně náročné je sušení konvekci.

Horkovzdušné sušení - konvekci

Ohřev sušeného materiálu se provádí horkým vzduchem (či spaliny), což snižuje relativní vlhkost vzduchu, který jako přenosové médium přichází do přímého nebo nepřímého kontaktu s produktem (kusovitý nebo zrnitý). Teplo, přestupující z horkého vzduchu do produktu, způsobuje odpařování vody [1]. Přiváděním příliš horkého vzduchu se sice dosáhne vyšší rychlosti sušení, ale zároveň dochází k úplné dehydrataci a uzavření pórů u povrchu sušených pevných materiálů, a tvoří se kůra (tzv. cementování), případně povrch materiálu rozpraská.

Způsob proudění sušícího média v konvekčních sušárnách [6]:

- a) Sušící plyn proudí podél povrchu vrstvy vlhké pevné látky buď z jedné strany, nebo z obou stran (shora i zdola).



Obrázek 1: Uložení vlhkého materiálu na lísce.

- b) Sušící plyn proudí vrstvou hrubších částic sušeného materiálu uloženého na síti.



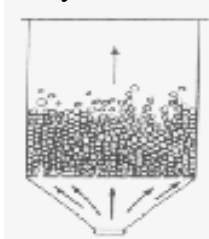
Obrázek 2: Uložení vlhkého materiálu na síti.

- c) Sušící plyn proudí např. rotujícím válcem, kde vlivem jeho otáčení přepadávají částice vlhkého materiálu. Proudění plynu je pomalé, aby nedocházelo k unášení částic.



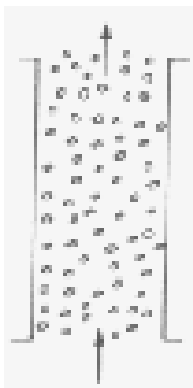
Obrázek3: Uložení vlhkého materiálu v rotujícím válci.

- d) Sušící plyn prochází vrstvou vlhkého zrnitého materiálu rychlostí větší, než je prahová rychlost fluidace. Plyn odcházející z fluidní vrstvy obsahuje určitý podíl sušeného materiálu, který se zachytává v cyklónu nebo filtru zařazeném za sušárnou.



Obrázek 4: Uložení vlhkého materiálu ve fluidní sušárně.

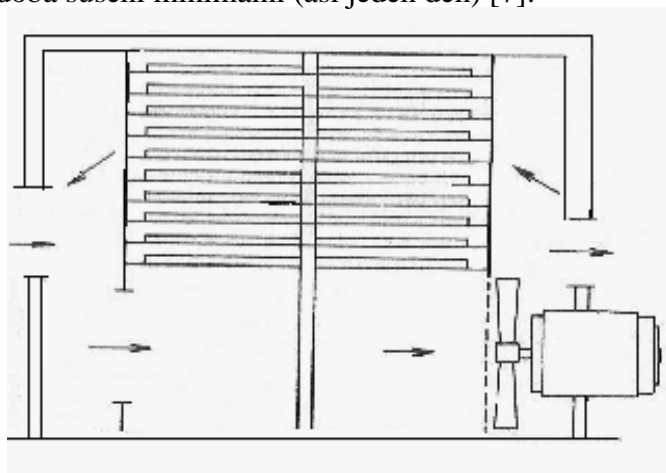
- e) Částice materiálu jsou sušeny a zároveň transportovány sušícím médiem, které má rychlost větší, než je prahová rychlost úletu částic.



Obrázek 5: Tok materiálu a plynu v pneumatické sušárně.

1. Skříňová (lísková) sušárna

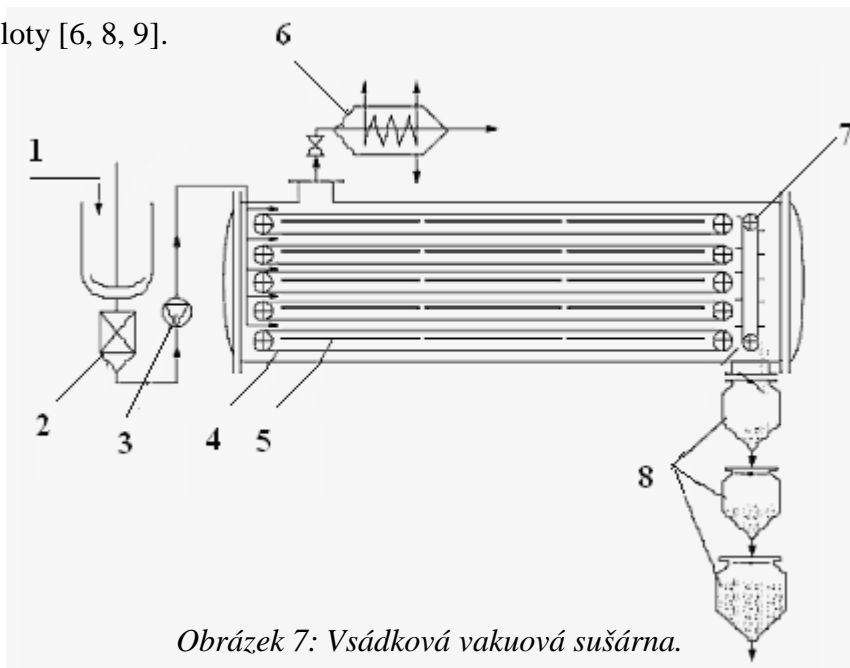
Skříňová sušárna (někdy uváděna jako komorová) [2, 7] se skládá z více etáží (lísk), na kterých je uložený v tenké vrstvě sušený materiál. Etáže je možné ze sušárny odebírat a naplňovat čerstvým materiálem, neboť jsou umístěné na vysouvacích a zasouvacích vozících. Periodická (neboli vsádková, přerušovaná) sušárna pracuje s recirkulací vzduchu a s kaloriferem vestavěným do sušárny [3]. Kalorifer je realizován jako výměník tepla vyhřívaný párou [2]. Ventilátorem se do sušárny nasává vzduch, míchající se s proudem procházejícím mezi etážemi a po průchodu kaloriferem se vhání mezi etáže. Dobrá izolace zamezí ztráty tepla, dále i teplota povrchu vnitřních stěn se udržuje na vysoké hodnotě, aby na nich nekondenzovala voda. Množství vzduchu cirkulujícího sušárnou je poměrně značné, hrozí unášení práškovitého materiálu do proudu vzduchu. Tento typ sušáren se využívá pro pastovité a kusové materiály, i v potravinářském průmyslu (sušení ovoce, zeleniny a masa) [2, 3]. V komorové sušárně suší i zmrazené knihy nebo dokumenty, kdy teplota proudícího média je 115°C , aby byla doba sušení minimální (asi jeden den) [7].



Obrázek 6: Skříňová sušárna.

2. Vakuová pásová nebo lisková sušárna

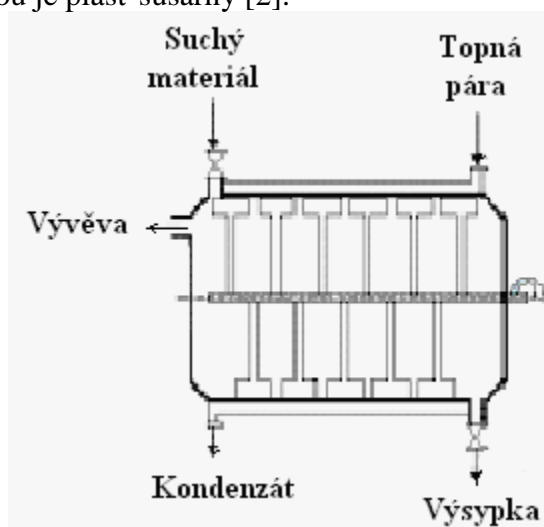
U vsádkové vakuové sušárny se suspenze nastříkuje či rozestírá na ocelový pás, který přechází přes dva duté bubny ve vakuové komoře. Nejprve dochází ke sdílení tepla konvekci na párou vyhřívaném bubnu a pak ke sdílení tepla kontaktem na párou vyhřívaných hadech, umístěných nad pásem. Vysušená pevná látka se dále chladí na jiném chlazeném válci a pak se seškrabuje nožem. Vakuové sušárny jsou finančně náročnější než sušárny pracující za atmosférického tlaku, ale jejich předností je sušení materiálu (např. potravin) velmi citlivých na vysoké teploty [6, 8, 9].



Obrázek 7: Vsádková vakuová sušárna.

(1) Plnění materiálu do nádoby s míchadlem, (2) filtrační zařízení, (3) čerpadlo, (4) řemen, (5) topné panely, (6) kondenzátor, (7) škrabka, (8) produkt

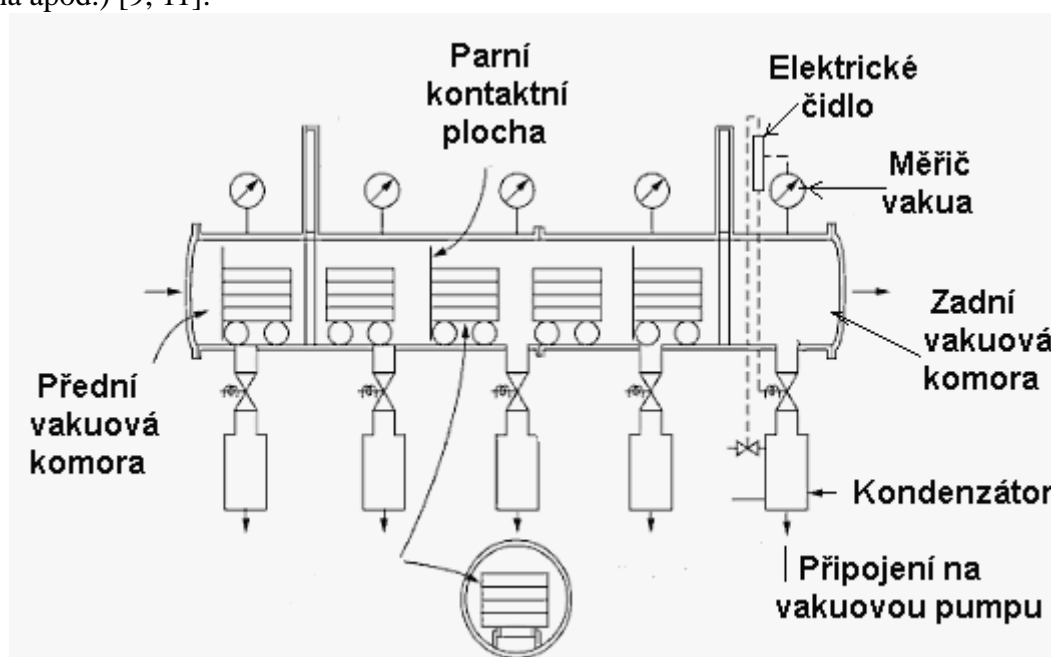
Mezi vakuové sušárny také patří **kontaktní lopatková sušárna**, u níž lopatky slouží k promíchávání sušeného materiálu (např. sušení barev, acetátu celulózy, práškových kovů) a vyhřívanou sušicí plochou je plášť sušárny [2].



Obrázek 8: Lopatková sušárna.

3. Lyofilizační sušárna

Lyofilizační sušárna se řadí mezi vakuové kontaktní sušárny, které odstraňují vodu z produktu sublimací a desorpcí. Cílem je uchovat citlivý materiál, který nelze sušit odpařováním [8]. Sušení probíhá ve vakuové komoře při teplotě pod bodem mrazu [10], aby vznikly malé ledové krystalky nepoškozující strukturu materiálu. Materiál se ochlazuje vakuovým chlazením, přímým kontaktem s kapalnými plyny nebo odvodem tepla do chlazených kontaktních ploch [2]. Poté se výrobek umístí do sušárny, kde je udržován tlak nižší než je tlak vodní páry v trojném bodě (610,5 Pa), voda se během procesu odpařuje přímo z pevné fáze (ledu) [11] a zachytává se ve vymrazovacím prostoru, nebo-li v kondenzátoru, jenž je chlazený na teplotu nižší než je teplota sušeného materiálu pod -50°C [1]. Ke snížení tlaku dochází pomocí vakuové pumpy. K úplnému vysoušení dochází během několika dnů [5]. S výhodou se používá při extrémních nárocích na kvalitu produktu ve farmacii (vitamíny) [6], pro lékařské aplikace, v potravinářství (krevní plazma, káva, čaj, mléko, maso, ovoce, zelenina apod.) [9, 11].

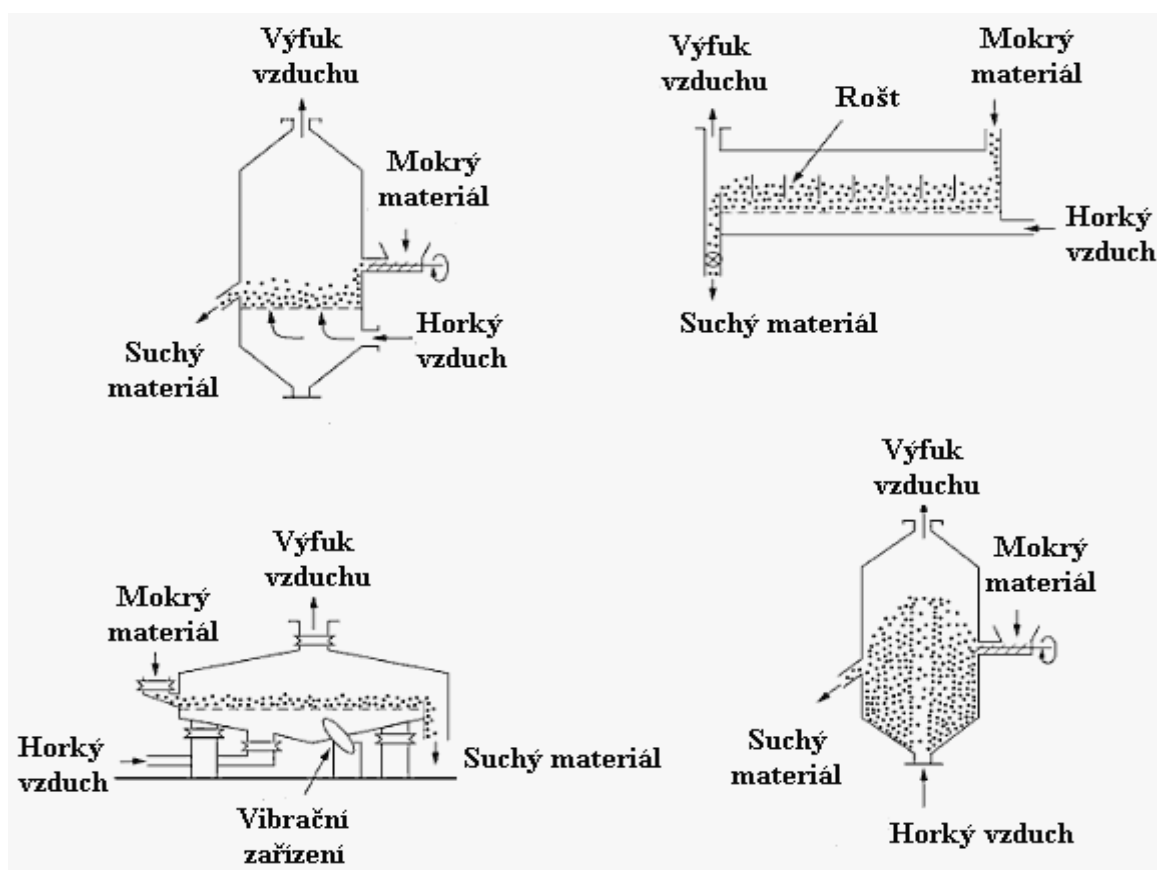


Obrázek 9: Lyofilizační tunelová sušárna.

4. Fluidační sušárna

Fluidní sušárny existují v různých konfiguracích lišících se uspořádáním fluidní vrstvy (až 30 typů) [9]. Mohou být jedno i vícestupňové, periodické i nepřetržité. Vlhký materiál je předem upraven na co nejmenší rozměr částic (atomizace), jež jsou dále distribuovány dle velikostí (nejlépe monodisperzní zrnitý materiál) [4]. Patří mezi konvekční sušárny, neboť tepelná energie dodávána vlhkému materiálu přechází z předem ohřátého plynu. Sušicím médiem může být buď horký vzduch nebo spaliny (spaliny vytvářejí inertní atmosféru, díky

níž lze dosáhnout vyšších teplot) [12]. Nejprve se plyn ohřívá na nastavenou teplotu ve výměníku tepla (v případě spalín ve spalovací komoře) [4] a poté ventilátorem proudí do sušicí komory (sušky [12]), kde uvádí vlhký materiál do vznosu (do fluidního stavu) [4]. Ze sušicí komory se vlhký plyn vede do odlučovače (cyklonu), kde dochází k oddělení unášených pevných částic [4, 12]. Doba sušení v kontinuální fluidní sušárně bývá 1 až 2 minuty k odpaření povrchové vody [6, 8, 12] a až 30 min pro intenzivní difúzi ve vsádkově pracující sušárně [6]. Tento typ sušících zařízení se využívá k sušení chemikálií, obilí a krystalového cukru. Jejich konstrukce umožňuje rovněž zpracovat pastovité látky a provádět granulaci [13]. Lze je využít i k sušení pevných paliv (hnědé uhlí) [6] nebo v případě proudové (pneumatické) sušárny k sušení kaolínu, kostní moučky či škrobu a kvasinek [3].



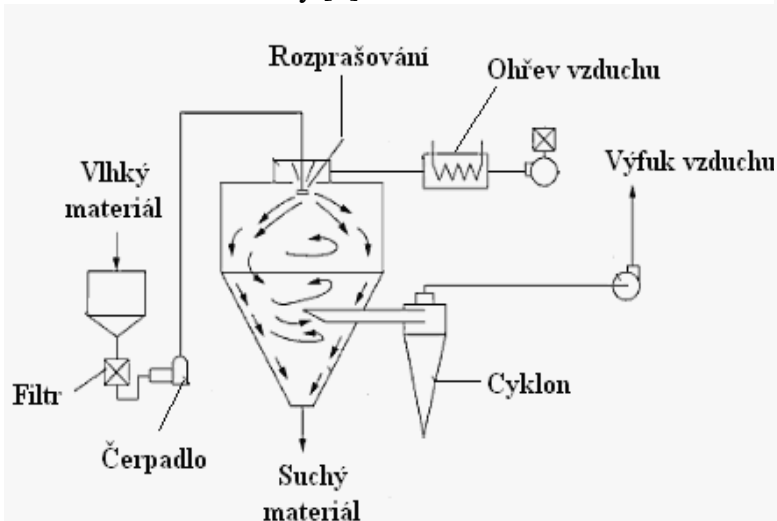
Obrázek 10: Typy fluidizačních sušáren.

5. Rozprašovací sušárna

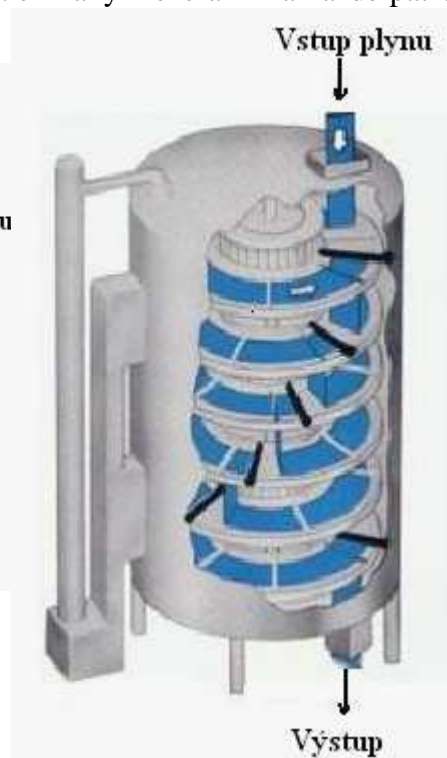
Koncentrované roztoky, koloidní, kapalně směsi s poměrně vysokým obsahem sušiny (prací prostředky, mléko, kakao, vejce apod.) se rozprašují v rozprašovacích sušárnách do proudu horkého vzduchu pomocí sprchové růžice s tryskami. Jemně rozprášené částice padají v protiproudu horkého plynu volným pádem na dno zařízení ve formě vysušeného jemného prášku. Rychlost sušení v rozprašovacích sušárnách je velmi vysoká, proto se zde mohou sušit také látky citlivé na teplo [2].

6. Turbínová sušárna

Patrová turbínová sušárna je protiproudé sušící zařízení, skládající se ze stojatého válce, ve kterém jsou nad sebou na jedné ose umístěné kruhové etáže (patra), které se pomalu otáčejí, přičemž materiál je nahoře dávkován a přepadává přes výřezy ve dně etáže na následující patro. Na každém patře se práškový, granulový nebo hrudkovitý sypný materiál [3] promíchává přicházejícím ohřátým vzduchem, jenž se nasává ve spodní části zařízení. Pomocí několika nad sebou uložených turbín je vzduch dále hnaný mezerami na každé patro uvnitř uzavřené sušárny [6].



Obrázek 11: Rozprašovací sušárna.



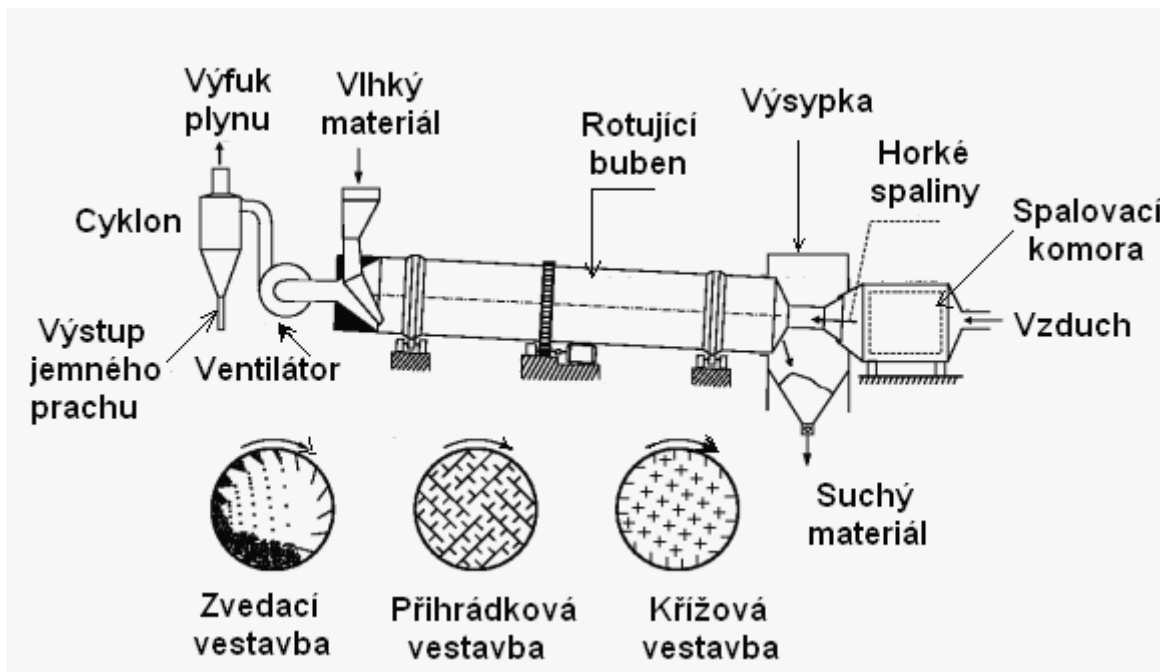
Obrázek 12: Turbínová sušárna.

7. Válcová sušárna, rotační bubnová sušárna

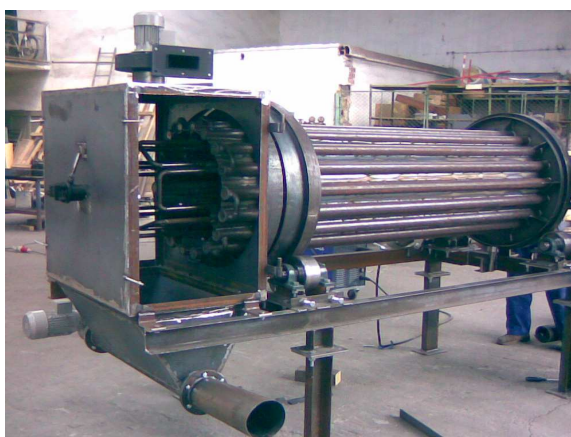
Bubnová sušárna patří k nejstarším kontinuálním strojům a z hlediska energetického a výkonnostního se řadí mezi nejlepší sušící zařízení. Suší se v ní převážně tkaniny [14], zahuštěné roztoky, pasty, kaly, sypký materiál (mléko, škrob, vločky [8]) a podobné látky.

Bubnové sušárny jsou ležaté, mírně skloněné, pomalu a neustále se otáčející ocelové válce, do kterých se materiál dávkuje na zvýšeném konci [4]. Počet bubnů může být více než jeden. Sušení se zde neuskutečňuje jako difúzní proces, neboť jeho hnací síla není daná koncentračním spádem. Duté bubny jsou uloženy v řadě za sebou, mohou být o průměru asi 2 až 3 m [2] a vyhřívají se převážně párou nebo dýmovými plyny na teplotu až 130° C. Plyn proudí vzhledem na pohyb materiálu protiproudě nebo souproudě. Otáčivým pohybem válce se materiál přesypává a pak se transportuje k druhému konci zařízení pomocí nože, přičemž pohyb materiálu usměrňují vestavěné dílce uvnitř válce. Vlhký materiál lze vysušovat i nepřímým ohřevem, tak že teplo se přivádí přes plášť válce, který je z vnější

strany ohřívány dýmovými plyny nebo je z části ponořený do kapaliny či suspenze. Někdy je vhodné přímý a nepřímý ohřev kombinovat [3].



Obrázek 13: Rotační bubnová sušárna a tři ukázky vestavby bubnu.



Obrázek 14: Kontaktní bubnová sušárna.



Obrázek 15: Bubnová sušárna skořápek.

Sušení vlhkým teplem v klimatizační komoře

Klimatizační komora zajišťuje libovolné nastavení teploty a vlhkosti vzduchu (obvykle 60° C a 35 % relativní vlhkosti) [5, 7]. Doba sušení při nucené cirkulaci vzduchu je zhruba dva týdny pro sušení dřeva [7] a pro sušení vlhkých knih asi 6 dní [5].

Superkritické sušení přehřátou párou

Přehřátá pára neobsahuje žádné kapičky vody, čímž je schopná přijmout více vlhkosti než nasycená pára. Sušení přehřátou párou probíhá v uzavřeném tlakovém okruhu, kde vzniká latentní teplo a pára následně kondenzuje, kondenzát se používá jako provozní voda. Pokud se sušení přehřátou párou provádí za sníženého tlaku, je nutné snížit bod varu. Doba sušení ovoce, zeleniny je několik minut [15].

Blanšírování

Primární funkcí blanšírování je inaktivovat nebo zpomalit působení bakterií, enzymů a vypuzení vzduchu, plynů z produktu. Před blanšírováním se čerstvá zelenina předehtívá, a to přímým ohřevem (ponor do horké až vroucí vody eventuálně do roztoku cukru, či jiných osmoticky aktivních látek) nebo nepřímým ohřevem (vystavení horké páře) [1]. Materiál je vystaven po krátkou dobu vysokým teplotám (1 až 5 minut) a následně ochlazen vzduchem či vodou. [8, 15].

Sušení infračerveným zářením

Infračervené záření způsobuje povrchový ohřev sušeného materiálu. Záření je emitováno odporově vyhřívanými topnými tělisky nebo porézními keramickými tělisky, na nichž probíhá katalytické spalování plynu. Používá se pro dosušování nátěrů aut, papíru a textilu [2]. Tenké vrstvy materiálů (nátěry, látky) se suší ozařováním infračerveným zářením. Tento způsob přívodu tepla je výhodný, umožňuje ohřát materiál na teplotu vyšší než je teplota vlhkého teploměru a vyšší než je teplota plynu, který je v kontaktu s povrchem materiálu. Toto sušení je velmi rychlé a při rovnoměrném ozáření nevznikají mrtvé (nevysušené) prostory.

Dielektrické sušení - mikrovlnný ohřev

Mikrovlny působí téměř výhradně na molekuly vody, která je vysoce polární látkou ve srovnání s ostatními složkami základního materiálu a naopak vůbec neúčinkují na zcela suché oblasti v produktu [16]. Sušení probíhá od středu k povrchu, čímž dochází ke vzniku vnitřního tepla a tlakového gradientu, který účinně „tlačí“ vodu k povrchu, odkud se rychle odvádí vzdušným prouděním. Přenos tepla a hmoty probíhá souběžně [17].

Mikrovlnné sušení se vyznačuje:

- ❖ vysokou energetickou účinností a rychlým odvodem vody,
- ❖ velmi přesným řízením tepelných dávek,
- ❖ šetrností vůči vysoušeným materiálům,
- ❖ v řadě případů je sušení prováděno při poměrně nízkých teplotách, které postačují k vypařování vody (60° C),
- ❖ nedochází u teplotně labilních materiálů k degradaci důležitých složek (vitaminy, sílice apod. [2]) a tím se nemění ani senzorické vlastnosti,
- ❖ průběžná kontrola sušícího procesu za optimálních podmínek,
- ❖ energetické úspory vzhledem k selektivnímu působení mikrovln jen na vlhkost,
- ❖ zajištěn i devitalizační účinek na mikrobiální patogenní činitele [13, 16, 17, 18].

2.1.3 Vlastnosti vlhkého vzduchu – fyzikální vlastnosti

Vlhký vzduch je směsí suchého vzduchu (*složka B*) a vody ve formě přehřáté či syté vodní páry = vlhkosti (*složka A*) [20]. Pro výpočty sušáren, chladících věží a klimatizací se vlhký vzduch považuje za směs ideálních plynů [19]. Ve skutečnosti, ale vlhký vzduch není ideálním plynem, tzn. že se obě složky vlhkého vzduchu (*A*, *B*) oproti ideálnímu plynu nemohou směřovat v libovolném poměru v celém oboru tlaků a teplot.

To znamená, že může docházet k těmto jevům:

- ❖ je-li teplota vlhkého vzduchu nižší, než je odpovídající teplota syté vodní páry, začíná voda ve vzduchu kondenzovat a tvoří se mlha,
- ❖ je-li teplota vlhkého vzduchu menší, než teplota sublimační, dochází k sublimaci vody ve vzduchu a tvoří se led či sníh.

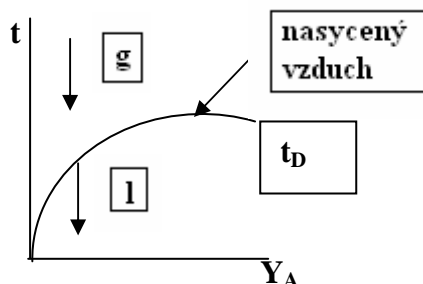
Vlhký vzduch se dělí na [20]:

- ❖ *nenasycený vzduch* (parciální tlak vodních par ve vzduchu je menší než tlak sytých par při téže teplotě)
- ❖ *nasycený vzduch* je vlhký vzduch, který při teplotě rosného bodu t_D obsahuje maximální množství vodní páry, (nachází se v termodynamické rovnováze se svou kapalnou fází a to při téže teplotě) ve vzduchu a vodní páry se sobě rovnají,
- ❖ *přesycený vzduch* je soubor nasyceného vzduchu a vody, kde voda může být buď ve formě mikroskopických kapiček = mlha, nebo v pevném skupenství).

2.1.4 Veličiny charakterizující vlhký vzduch

Teplota rosného bodu t_D [$^{\circ}\text{C}$] (z anglického dew point)¹

Teplota rosného bodu t_D je hojně využívanou a přímo měřitelnou charakteristikou vlhkosti vzduchu. Je to teplota při níž je vzduch právě nasycen (relativní vlhkost $\varphi_A = 100\%$). Dalším snižováním teploty začíná vodní pára kondenzovat [2], tento jev lze pozorovat např. v chladném počasí na orosení brýlí při vstupu do zadýchané místnosti (kde je nasycený vzduch).

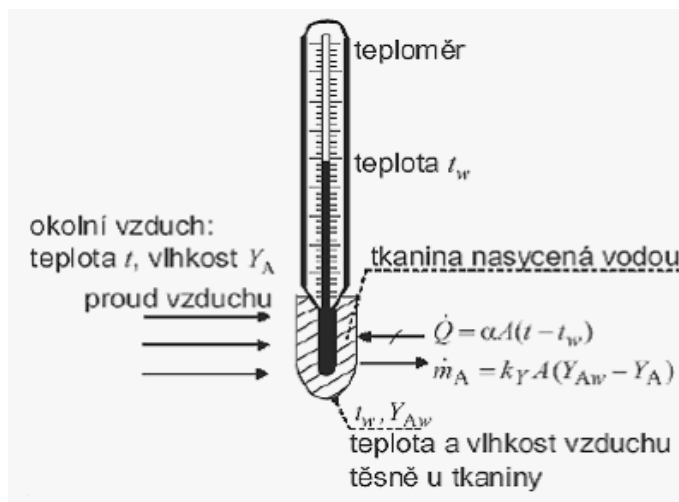


Obrázek 16: Fázový diagram směsi vzduch – voda.

¹ V některých českých literaturách se můžeme setkat s jiným označením teploty rosného bodu - t_r .

Teplota mokrého teploměru t_w [$^{\circ}\text{C}$] (z anglického wet bulb)²

Při teplotě mokrého teploměru t_w a při izobarickém ději je teplo potřebné k odpařování odebíráno konvekcí z okolního vzduchu. Je to teplota, již ukazuje teploměr obalený mokrou punčoškou při vynuceném obtékání vlhkým vzduchem a při odstínění proti tepelnému záření (psychrometr = měřicí přístroj, kde jsou dva teploměry, z nichž jeden měří teplotu suchého teploměru t_2 a druhý teplotu mokrého teploměru t_w) [20, 21]. Tato teplota je také označována jako mezní teplota adiabatického chlazení [20].



Obrázek 17: Teplota mokrého teploměru.

Relativní hmotnostní zlomek vody ve vzduchu Y_A [-]

Ve starší literatuře se takto označuje absolutní vlhkost vzduchu, vyjádřená bezrozměrovým podílem hmotnosti vlhkosti v plynné fázi m_A a hmotnosti suchého vzduchu v daném vzorku m_B [2]. Dále se uvádí relativní hmotnostní zlomek vody ve vzduchu Y_{Aw} [-] nasyceném při teplotě mokrého teploměru t_w ($^{\circ}\text{C}$) na fázovém rozhraní mezi vzduchem a mokrým materiálem.

Relativní měrná enthalpie I [kJ/kg]

Relativní měrná enthalpie je tepelná energie takového množství vlhkého vzduchu, které obsahuje 1 kg suchého vzduchu, proto je I [19]. Nulová hodnota enthalpie se přiřazuje suchému vzduchu a kapalně vodě při teplotě 0°C [2]. Také se rozlišuje měrná enthalpie před kaloriferem I_1 [kJ/kg] a měrná enthalpie za kaloriferem I_2 [kJ/kg].

Teplota suchého teploměru t_2 [$^{\circ}\text{C}$]

Teplota suchého teploměru je teplota vzduchu, který je považován za suchý a to tehdy, je-li relativní vlhkost plynu $\varphi_A = 0\%$.

² Někdy také označována jako teplota vlhkého teploměru - t_w

Relativní vlhkost vzduchu φ_A [%]

Relativní vlhkost udává nakolik je vzduch nasycen a dá se vyjádřit poměrem parciálního tlaku vlhkosti ve vzduchu a tenze vodní páry při teplotě vzduchu. V entalpickém diagramu lze nalézt hodnoty φ_A v procentech, kdy maximální hodnota relativní vlhkosti je 1. $\varphi_A = 100$ % znamená zcela nasycený vzduch [20].

Parciální tlak vodní páry p_A [Pa]

V případě uvažování vlhkého vzduchu za ideální směs, lze dle Daltonova zákona vyjádřit obsah vodní páry ve vzduchu p_A jako součin molárního zlomku páry y_A a celkového tlaku p . Pro určení parciálního tlaku syté páry p_v'' v rozmezí teplot 0°C až 80°C lze použít níže uvedený vztah s chybou do 1 %. [20].

$$\ln p_v'' = 23,58 - \frac{4044,2}{235,6 + t} [Pa] \quad (1)$$

Atmosférický tlak p [Pa]

Někdy se lze setkat s barometrickým tlakem p_b který je dán součtem parciálních tlaků vodní páry a suchého vzduchu.

Tenze vodní páry p_A^0 [Pa]

Tenze vodní páry p_A^0 je rovnovážný tlak páry nad čistou vodou při teplotě vzduchu. Rozlišuje se tenze vodní páry p_A^0 při teplotě suchého teploměru t_2 [$^\circ \text{C}$] a tenze vodní páry p_W^0 [Pa] při teplotě t_W [$^\circ \text{C}$].

Hustota vlhkého vzduchu ρ_{vlz} [kg/m^3]

Pomocí měřitelných veličin φ_A , p_b a parciálního tlaku syté páry p_v'' lze snadno stanovit hustotu vlhkého vzduchu [20].

$$\rho_{vlz} = \frac{p_b}{287 \cdot T_{lab}} \left(1 - \frac{0,378 \cdot \varphi_{lab} \cdot p_v''}{p_b} \right) [kg / m^3] \quad (2)$$

Některé z veličin charakterizujících vlhký vzduch (φ_A , t_D , t_W , p_b) lze v rámci procesu sušení stanovit přímým měřením (psychrometrem) nebo (i) pomocí jistých vztahů nebo (ii) entalpických diagramů vzájemně přepočítávat, jsou-li známy kterékoli dvě veličiny z pěti t_2 , φ_A , Y_A , t_W , I a barometrický tlak [19].

(i) Přibližné vztahy pro výpočet veličin charakterizujících vlhký vzduch [19]

$$I = 1,006t + (2501 + 1,775t)Y_A [J.kg^{-1}] \quad (3)$$

$$\varphi = \frac{p_A}{p_A^0} \cdot 100 [\%] \quad (4)$$

$$p_A = \frac{Y_A \cdot p_b}{(0,622 + Y_A)} [Pa] \quad (5)$$

$$p_{AW} = \frac{Y_{AW} \cdot p_b}{(0,622 + Y_{AW})} [Pa] \quad (6)$$

$$Y_{AW} = \frac{Y_A (2501 + 1,775 \cdot t_2 - 4,186 \cdot t_w) + 1,006 (t_2 - t_w)}{2501 - 2,411 \cdot t_w} [-] \quad (7)$$

$$\Delta h_{lv,A} = (2419,53 \cdot \tau^{1/3} - 795,21 \cdot \tau^{2/3} + 6102,03 \cdot \tau - 23771,6 \cdot \tau^{5/3} + 19241 \cdot \tau^{11/6}) \cdot 18,015 [J \cdot mol^{-1}] \quad (8)$$

$$\tau = 1 - \frac{T_w}{647,126}$$

kde t_i [$^{\circ}C$] a T_i [K] [22], $\Delta h_{lv,A}$ – výparná entalpie vody při teplotě t_w .

Tyto výše uvedené rovnice poskytují výsledky s chybou menší než 1 %, a to v rozmezí teplot 0,001 až 100 $^{\circ}C$ a v intervalu tlaků 0,05 až 0,15 MPa [19].

(ii) Entalpický diagram vlhkého vzduchu

Veličiny charakterizující fyzikální vlastnosti vlhkého vzduchu lze rovněž stanovit graficky pomocí entalpického diagramu vlhkého vzduchu, za izobarických podmínek.

Grafické znázornění entalpického diagramu může být v různých formách:

- psychometrický diagram ASHRAE
- Mollierův - Ramzinův h-x diagram

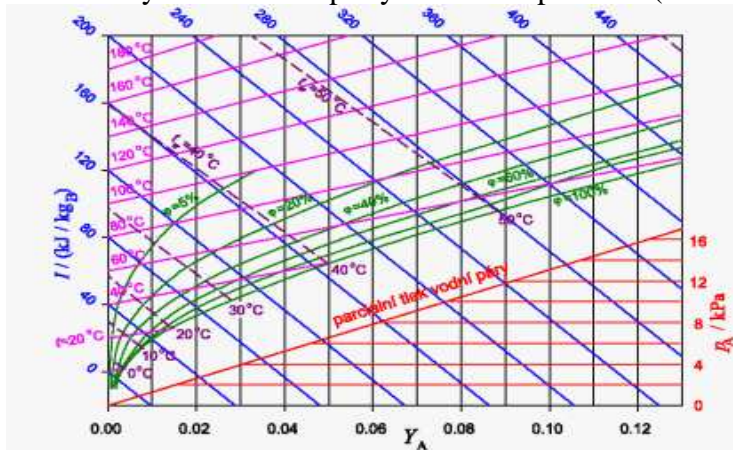
Základní osy diagramu (viz *Obrázek 18: Entalpický diagram vlhkého vzduchu*):

- relativní měrná entalpie I (kJ/kg suchého vzduchu), vyznačena (modře),
- relativní hmotnostní zlomek vlhkosti ve vzduchu Y_A [-] (černě).

Křivka kondenzace v dolní části grafu vymezuje oblast plynné fáze a heterogenní oblast (fázi kapalnou a plynnou).

Do souřadnicové sítě se dále zakreslují:

- izotermy (růžově),
- parciální tlak vodní páry (červeně)
- relativní vlhkost (zeleně) a
- čáry konstantní teploty vlhkého teploměru (fialově čárkovaně).



Obrázek 18: Entalpický diagram vlhkého vzduchu.



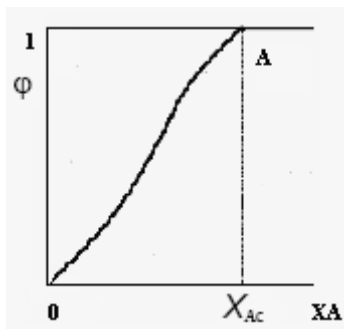
Obrázek 19: Richard Mollier.

2.1.5 Vlastnosti sušeného materiálu

Vlhkost materiálu

Vlhkost sušeného materiálu je vhodné vyjádřit jejím relativním hmotnostním zlomkem X_A [-], označí-li se hmotnost vlhkosti v materiálu m_A [kg] a hmotnost sušiny m_C [kg], platí:

$$X_A = \frac{m_A}{m_C} \quad (9)$$



Pokud přesáhne vlhkost materiálu jistou kritickou hodnotu X_{AC} , bude se tento materiál chovat jako čistá kapalina (materiál je zcela pokrytý touto kapalinou; viz *Obrázek 20: Závislost ϕ na X_A*). Pro vlhkost $X_A \geq X_{AC}$ je při rovnováze $\phi = 1$.

Obrázek 20: Závislost ϕ na X_A .

V rámci sušení je rovněž důležité brát v úvahu i jiné vlastnosti materiálu, jako distribuce velikosti sušených částic, porézní strukturu materiálu, rozpustnost materiálu ve zkondenzované vlhkosti, mechanickou pevnost, charakteristickou dobu relaxace napětí vzniklého při odstraňování vlhkosti, citlivost materiálu na sušící teplotu či maximální dobu expozice vysoké teplotě [2].

2.1.6 Kinetika periodického konvekčního sušení

Sušení materiálu probíhá v takovém přebytku proudícího plynu, aby přestup hmoty v plynné fázi neovlivnil vlhkost proudícího média, tzn. že vlhkost plynu Y_A je prakticky konstantní [2].

Rychlost sušení Φ_A [$kg \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$] je definována intenzitou hmotnostního toku vlhkosti z povrchu materiálu, vyjádřená jako přestup vlhkosti.

Nemění-li se podél fázového rozhraní rychlost sušení [23] platí:

$$\phi_A = \frac{\dot{m}_A}{A} = k_Y (Y_{AW} - Y_A) \left[kg \cdot m^{-2} \cdot s^{-1} \right] \quad (10)$$

Y_{AW} - koncentrace vlhkosti plynu u fázového rozhraní

\dot{m}_A - hmotnostní tok odpařované vlhkosti [kg]

k_Y - koeficient přestupu hmoty [$kg \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$]

A - plocha fázového rozhraní [m^2]

$(Y_{AW} - Y_A)$ - je hybnou silou sušení

Jiný způsob vyjádření rychlosti sušení je pomocí parciálních tlaků vodní páry ve vzduchu:

$$\phi_A = k_p (p_{AW} - p_A) \left[\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \right] \quad (11)$$

Bilance vlhkosti v materiálu (úbytku vody Δm_A) pro elementární časový interval $d\tau$:

$$\phi_{Ai} = \frac{\Delta m_{Ai}}{A \cdot \Delta \tau} = \frac{\Delta m_{Ai}}{A \cdot (\tau_{i+1} - \tau_i)} \left[\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \right] \quad (12)$$

Sušení při konstantních parametrech sušícího plynu

Závislost rychlosti sušení na koncentraci vlhkosti materiálu při konstantních parametrech sušícího plynu, tj. k_Y , Y_{AW} , Y_A vykazuje zlom při koncentraci X_{AC} . Kapalina na povrchu materiálu má konstantní teplotu rovnou teplotě mokrého teploměru. Doba, po kterou sušený materiál zůstává pokryt kapalinou, se nazývá období konstantní rychlosti sušení, kdy rychlost sušení je určena jen rychlostí přestupu hmoty v sušícím plynu [23].

$$\phi_{Ai} = -\frac{m_C}{A} \cdot \frac{dX_A}{d\tau} \left[\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \right] \quad (13)$$

Rozdělení období sušení

➤ Počáteční období

Materiál se začne ohřívat z počáteční teploty na teplotu t_w , zároveň se z povrchu materiálu začíná odpařovat vlhkost a zpomalovat proces ohřívání materiálu se následně zpomalí, jelikož se na něj spotřebovává teplo dodávané ze sušícího vzduchu. Toto období je velmi těžce postřehnutelné (viz *Obrázek 21*; úsek křivky AB) [24] a lze ho nazvat dobou ohřevu materiálu.

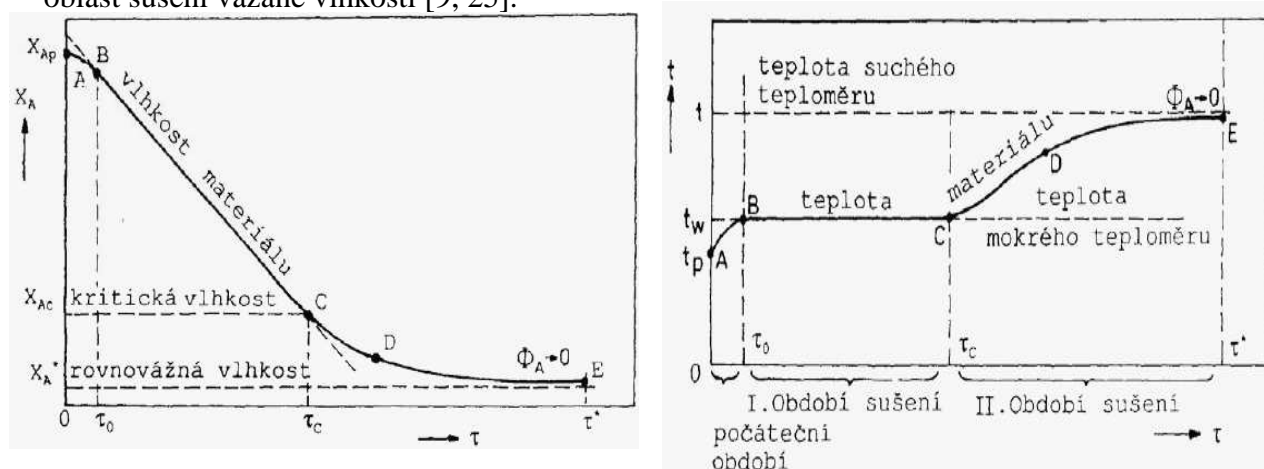
➤ I. období sušení

Teplota materiálu v tomto období se ustálí na teplotě mokrého teploměru a vlhkost materiálu je $X_A \geq X_{AC}$. Všechno teplo dodávané sušícím médiem se spotřebovává na odpařování nevázané vody. Hybná síla je konstantní (viz *Obrázek 21*; úsek křivky BC). Toto období se rovněž nazývá oblast konstantní rychlosti sušení, nadkritická oblast nebo oblast sušení nevázané vlhkosti [2, 25].

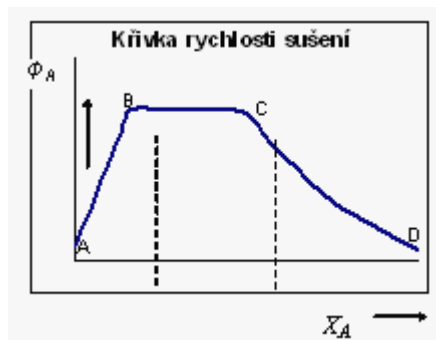
➤ II. období sušení

Je-li vlhkost materiálu menší než kritická, začne se rychlost sušení materiálu snižovat, tj. v okamžiku dosažení bodu C (viz *Obrázek 21*), kdy přichází do přímého kontaktu první částice pevného materiálu se sušícím médiem (povrch materiálu již nepokrývá vrstva kapaliny). Teplota materiálu je vyšší než t_w , ale nižší než teplota sušícího plynu, bod D. Zpomaluje se sdílení tepla a hmoty. V bodě E dosáhne teplota materiálu téměř teploty

sušícího plynu, sušení se zastavuje a materiál v daném prostředí již nelze více vysušit. Tato oblast je alternativně též nazvaná jako oblast klesající rychlosti sušení, podkritická oblast, oblast sušení vázané vlhkosti [9, 25].



Obrázek 21: Kvantitativní průběh závislosti obsahu vlhkosti v materiálu na čase.



Obrázek 22: Průběh rychlosti sušení. [21]

Pro zjednodušení se další výpočty vztahují k I. období sušení, kdy rychlost sušení nezávisí na místě v sušárně ani na čase a teplo dodané konvekcí do sušeného materiálu se využívá výhradně k odpařování vlhkosti [24].

Koeficient přestupu tepla $\alpha [W.m^{-2}.K^{-1}]$ [4, 23, 24]:

$$\alpha = \frac{\Delta h_{lv,A} \cdot \phi_{Al}}{T_2 - T_w}, \text{ kde } \Delta h_{lv,A} \text{ je měrnou výparnou entalpií vody při teplotě } T_w [K]. \quad (14)$$

Analogii mezi sdílením tepla a hmoty lze vyjádřit α vztahem pro vlhký vzduch:

$$\alpha = k_Y \cdot C_{pg} [W.m^{-2}.K^{-1}], \quad (15)$$

kde $C_{pg} [J.kg^{-1}.K^{-1}]$ - měrná tepelná kapacita vlhkého vzduchu, vztažená na 1 kg suchého vzduchu.

Výpočet hmotnosti odpařené vody $m_{ov} [kg]$:

$$m_{ov} = \frac{m_0 - m_i}{1000} \quad (16)$$

m_0 - údaj na váze [g] v čase $\tau = 0$, tzn. hmotnost mokrého materiálu i s lískou

m_i – údaj na váze [g] v čase následujícím po čase τ_{i-1} , tzn. váha mokrého materiálu s lískou

Výpočet úbytku vody Δm_A [kg]:

$$\Delta m_A = \frac{m_{i-1} - m_i}{1000} \quad (17)$$

Výpočet obsahu vody v materiálu m_A [kg]:

$$m_A = m_{A0} - m_{ov} \quad (18)$$

m_{A0} – hmotnost vody na počátku [kg]

2.1.7 Charakteristika sušárny

Následující charakteristiky sušárny jsou důležité k jejímu ekonomickému a provoznímu hodnocení [23]. Jsou rovněž uvedeny pro **I. období sušení**.

Spotřeba sušícího vzduchu m_{BI} [kg]:

Spotřebu absolutně suchého vzduchu za I. období sušení lze vypočítat [24]:

$$m_{BI} = \frac{\dot{V} \cdot \tau_I}{v \cdot (1 + Y_{A1})} [kg] \quad (19)$$

\dot{V} – objemový průtok vzduchu [$m^3 \cdot h^{-1}$] v – měrný objem sušícího vzduchu [$m^3 \cdot kg^{-1}$]

τ_I – doba trvání I. období sušení [h]

Měrná spotřeba sušícího vzduchu l [-]:

Měrná spotřeba vzduchu je hmotnost absolutně suchého vzduchu potřebná na vypaření 1 kg vody v I. období sušení [23]:

$$l = \frac{m_{BI}}{m_{AI}} [-] \quad (20)$$

Hmotnost odpařené vody m_{AI} [kg]:

Hmotnost odpařené vody z materiálu za I. období sušení je [24]:

$$m_{AI} = A \cdot \Phi_A \cdot \tau_I [kg] \quad (21)$$

Spotřeba tepla dodaného elektrickým topením Q_T [J]:

Spotřeba tepla Q_T dodaného sušícímu vzduchu během I. období sušení se určí [24]:

$$Q_T = (I_2 - I_1) \cdot m_{BI} [J] \quad (22)$$

I_1 - měrná entalpie před kaloriferem ($J \cdot kg^{-1}$) při teplotě vzduchu před kaloriferem (ohříváčem)

I_2 - měrná entalpie za kaloriferem ($J \cdot kg^{-1}$) při teplotě suchého vzduchu

Spotřeba tepla dodaného k odpaření vody Q_I [kg]:

Spotřeba tepla nutná k odpaření vody za I. období sušení (při t_w) je [24]:

$$Q_I = \Delta h_{lv,A} \cdot m_{AI} [J] \quad (23)$$

Skutečná spotřeba tepla Q_{SK} [J]:

Určí se z naměřených hodnot spotřeby elektrické energie při sledování elektroměru sušárny, tj. rozdíl konečné hodnoty od počáteční za sledované I. období sušení. Výsledná hodnota Q_{SK} bude snížena o ztráty, vzniklé průtokem vzduchu potrubím.

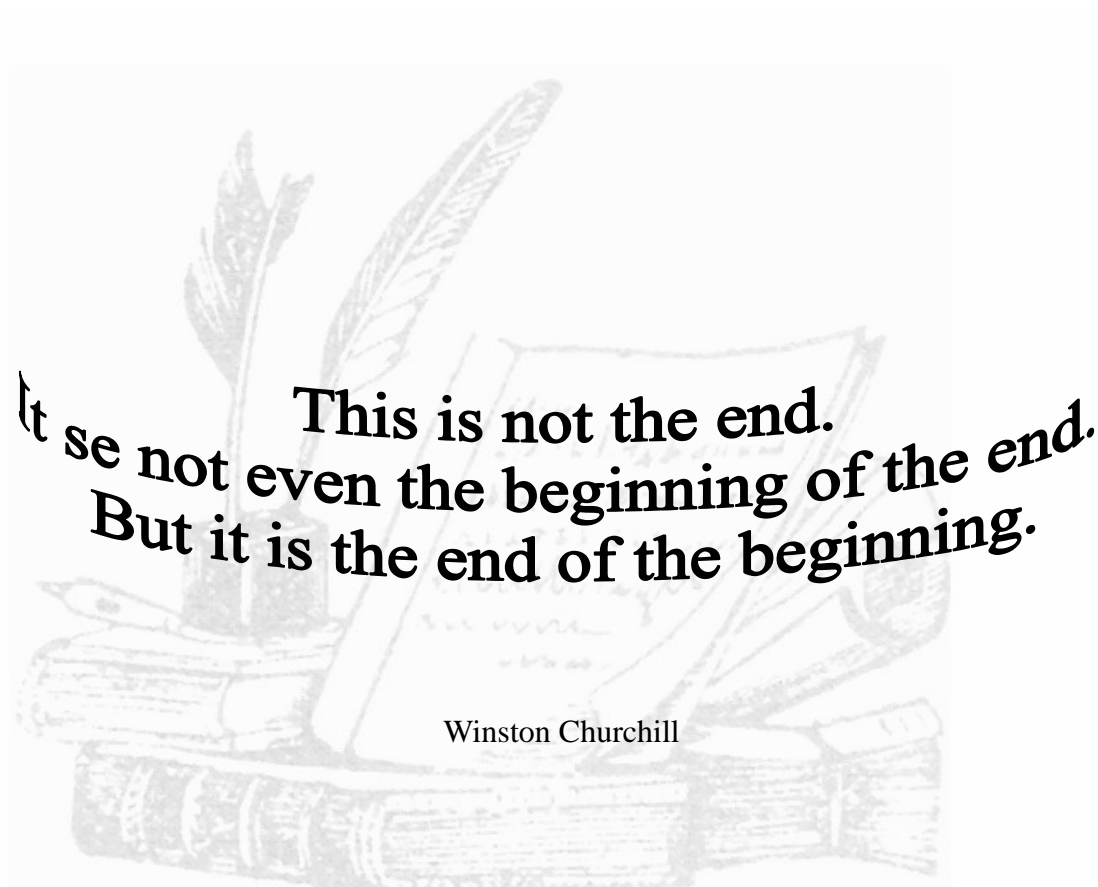
Výpočet tepelné účinnosti sušárny – z měrných entalpií – teoretická η_1 [%]:

Tepelná účinnost za I. období sušení je [24]:

$$\eta_1 = \frac{Q_I}{Q_T} \cdot 100 [\%] \quad (24)$$

Výpočet tepelné účinnosti sušárny – ze spotřebované energie odečtené z elektroměru - praktická η_2 [%]:

$$\eta_2 = \frac{Q_I}{Q_{SK}} \cdot 100 [\%] \quad (25)$$



2.2 TEORETICKÁ ČÁST - Filtrace

2.2.1 Proces mechanické separace

Mnoho průmyslových výrobních zařízení je založeno na oddělování minimálně dvou fází (heterogenních směsí). Separace jsou rozděleny do dvou tříd, kde tou první jsou difúzní operace, zahrnující přenos materiálu mezi fázemi. Druhou třídou jsou mechanické separace [6].

Heterogenní směsí mohou být:

- pevné částice v plynu,
- pevné částice v kapalině,
- směs minimálně dvou typů či různých velikostí pevných částic,
- kapičky kapaliny v plynu,
- kapičky jedné kapaliny dispergované v jiné kapalině

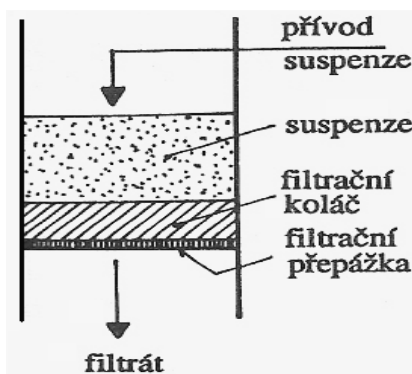
Separční techniky jsou založeny na:

- fyzikálních vlastnostech částic,
- velikosti a tvaru částic,
- hustotě částic
- hustotě a viskozitě tekutiny

2.2.2 Proces filtrace

Filtrací dochází k oddělování dispergované fáze (suspendované), nebo disperzního podílu z tekutiny, pomocí porézní filtrační přepážky [26], kdy póry v přepážce jsou natolik malé, že jimi disperzní podíl neprojde a vytváří zde produkt = *filtrační koláč* (v případě pevného disperzního podílu). A naopak jsou póry v přepážce natolik velké, aby jimi mohla protékat oddělená čistá tekutina = *filtrát* (druhý produkt) [2].

V tabulce 4 jsou rozděleny filtrační procesy a v tabulce 5 uvedeny parametry filtrace.



Obrázek 23: Princip činnosti filtru.

Tabulka 4: Rozdělení filtračních procesů. [6, 9, 27]

Typ filtrace	Velikost částic [μm]	Typ částic	Mechanismy
makrofiltrace	1 – 1000	saze, popílek	přímý záchyt
mikrofiltrace	0,1 - 10	aerosol barviv, emulze olej-voda, kal z piva, bakterie	setrvačné usazení
pervaporace	<1	molekuly plynu, separace vod	Brownův pohyb
ultrafiltrace	0,1 - 0,001	makromolekuly, cigaretový kouř, smog, enzymy, viry	Brownův pohyb
nanofiltrace	~0,001	molekuly cukru, roztoky solí	elektrostatické usazení
hyperfiltrace (reverzní osmóza)	<0,0001	kovové ionty, odsolování vody	elektrostatické usazení

Tabulka 5: Parametry filtrace. [27]

Filtrační přepážka	Částice	Filtrace	Vnější vlivy
plocha, pórovitost filtru	koncentrace	rychlost náletu částic na filtr	mechanické
tloušťka filtru	velikost	viskozita média	chemické
odolnost vůči negativním vlivům	elektrické vlastnosti	fyzikální vlastnosti média a disperzního podílu	teplota
efektivita, životnost	tvar	tlakový spád	kombinace

Filtrační přepážka

Aby byla filtrace účinná a hospodárná (časově i energeticky), měla by tekutina obsahovat více než 1 obj. % heterogenních suspendovaných částic. Pod tuto mez nebo v rozmezí 0,1 až 1 obj. % se směs musí před filtrací upravit. např. usazováním [4, 28].

Suspenze je filtrována pomocí porézní filtrační přepážky umístěné ve filtru v rovině kolmé na směr toku suspenze a filtrátu. Vzhledem k vlastnostem suspenze se rozlišuje také materiál, ze kterého je přepážka vyrobena (papír, textilní tkanina, síto, deska z porézní keramiky nebo skla, makroporézní polymerní membrána) [2, 29]. V případě *koláčové filtrace* působí filtrační přepážka jako aktivní filtrační prostředek jen z počátku filtrace, než se vytvoří filtrační koláč, poté se již částice zachytávají na této vrstvě, čímž koláč narůstá. U *hloubkové filtrace* se částice usazují v pórech (viz *Obrázek 24: Uzavřený pískový filtr*) [2].

Dle vnitřní morfologie lze přepážky dělit na:

- filtrační přepážky se zrnitou strukturou
- filtrační přepážky s vláknitou strukturou
- kompaktní filtrační přepážky s kanálkovou strukturou [2].

Hnací síla filtrace

Aby filtrace proběhla, je nutno vytvořit podmínky pro překonání tlakové ztráty při toku filtrátu filtračním koláčem a filtrační přepážkou, tj. filtrační rozdíl tlaků před a za filtrem.

Hnací sílu filtrace je možné dodat několika způsoby:

- hydrostatickým tlakem pomocí sloupce kapaliny filtrované suspenze – *gravitační filtry*
- přetlakem na vstupní straně filtru – *tlakové filtry*
- podtlakem na výstupu z filtru – *vakuové filtry*
- odstředivou silou – *filtrační odstředivky*
- čerpáním suspenze do filtru pomocí čerpadla [2, 4, 29].

Filtrační koláč

- **stlačitelný:** vlivem zvýšeného tlaku dochází ke změnám charakteristik filtračního koláče (mezerovitosti, relativního specifického povrchu)
- **nestlačitelný:** ke změnám charakteristik filtračního koláče nedochází vlivem zvýšeného tlaku; je typický pro krystalické částice [29].

Typy filtračních zařízení - filtrů

Dle způsobu vytváření tlakového rozdílu se filtrační zařízení rozlišují:

- tlakové (přetlak před filtrem),
- vakuové (přetlak za filtrem) [6, 30, 31]

Dle práce existují filtrační zařízení:

- kontinuální (nepřetržité),
- periodické (cyklicky pracující) [6, 30, 31]

Tři hlavní skupiny filtrů:

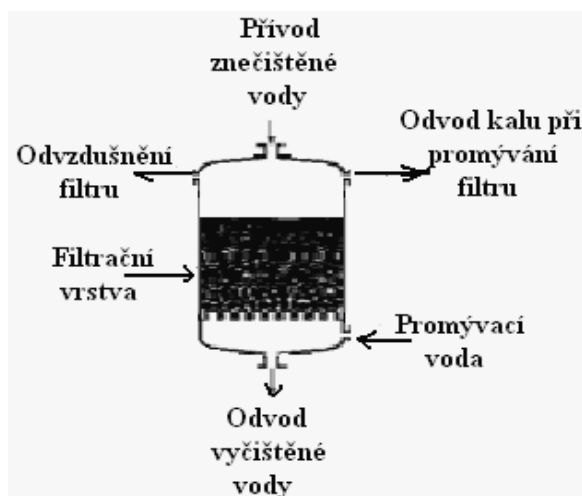
- koláčové - makrofiltrace
- čistící (membránové) – ultrafiltrace, nanofiltrace, hyperfiltrace
- průtokové [6] – mikrofiltrace, pervaporace

2.2.3 Koláčové filtry - vsádkové

Filtrační nádrže – pískové filtry

Nejstarším typem filtračních zařízení, jsou otevřené nebo uzavřené nádoby s perforovaným dnem (nebo kloboučkovým dnem [26]), na kterém je v několika vrstvách

nanesen filtrační materiál s postupně se zmenšující velikostí zrna [2, 26, 30]. Otevřené nádrže se dnes již nepoužívají, neboť jako tlakový rozdíl můžou využívat jen hydrostatický tlak přiváděné suspenze a proto jsou málo výkonné. Uzavřené nádrže slouží k filtraci vody [30].



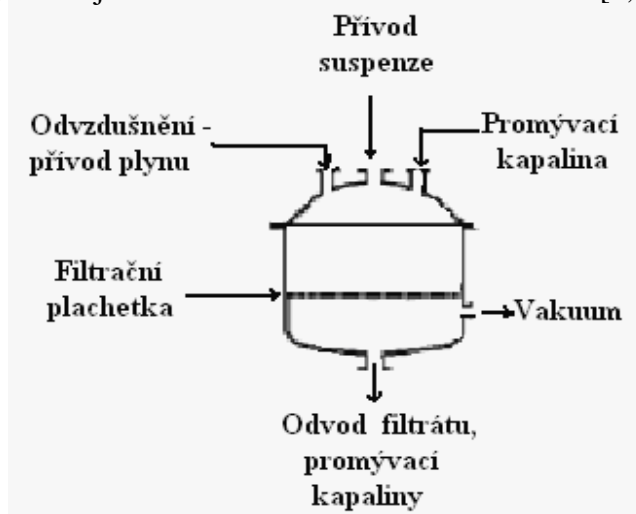
Obrázek 24: Uzavřený pískový filtr.

Cedidla

Takzvaný vakuový *Mooreoe filter* je tvořen drátěnou sítkou (může jich být několik), na niž jsou připevněny filtrační tkaniny sloužící jako filtrační přepážka. *Sweetland filter* je tlaková uzavřená nádrž [30].

Filtrační nuč

Filtrační nuč se řadí k nejjednodušším cyklicky pracujícím filtrům (v laboratoři jako *Büchnerova nálevka*). Děrované dno může být pokryto tkaninou nebo ve speciálních případech koksem, dřevěným uhlím [30] nebo keramickými dlaždicemi z porézního materiálu [29]. Může být v provedení podtlakovém (snížený tlak pod filtrační přepážkou, napojením na vývěvu). Někdy se užívá též přetlaková nuč, shora uzavřená (zvýšený tlak před filtrační přepážkou) [26]. Nevýhodou je ruční odstraňování vzniklého koláče [2, 29].



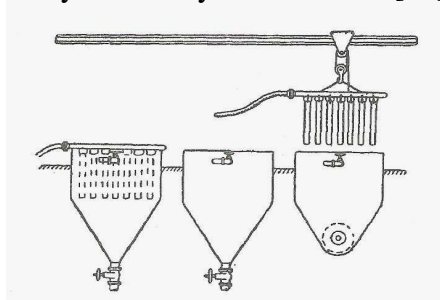
Obrázek 25: Vakuová filtrační nuč.

Rukávové filtry

Uvnitř komory rukávových filtrů jsou textilní rukávy, v dolní části připevněny k otvorům v dělicí ploše a v horní části zavěšeny na konstrukci spojené se střásacím zařízením. Místo mechanického setřásání se užívá i tlakový vzduch [26]. Tyto filtry slouží k zachycení velmi jemného prachu unášeného plynem, odstranění popílku ze spalin v elektrárnách (účinnost je až 99 %) [26, 30].

Listový filtr (vakuový)

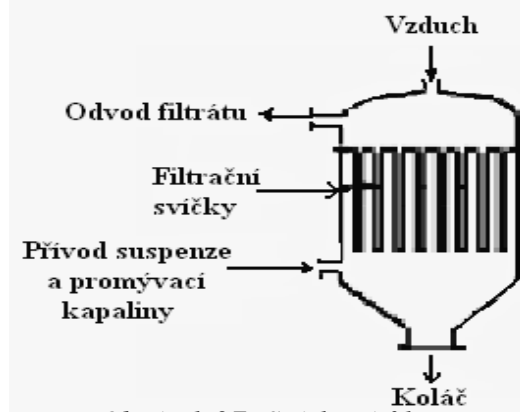
Listový filtr je tvořen větším počtem (až 30 ks) tzv. listů, upevněných na trubkovém rámu, který lze zvednout a přemístit. Každý článek (list) tvoří drátěná síťka potažená zdvojenou filtrační přepážkou. Rám s listy je ponořen do nádrže se suspenzí a vytvoří se podtlak, filtrát prochází vnitřkem listů a odsává se trubkovým rámem do sběrného potrubí. Filtrační koláč se usazuje na vnějším povrchu článku, poté se celý rám i s listy a filtračním koláčem přemístí do promývací nádrže a následně do nádoby na odstraňování koláče proudem vzduchu či páry [2, 29]. Listové filtry mohou být také tlakové [29].



Obrázek 26: Listový filtr.

Svíčkový filtr

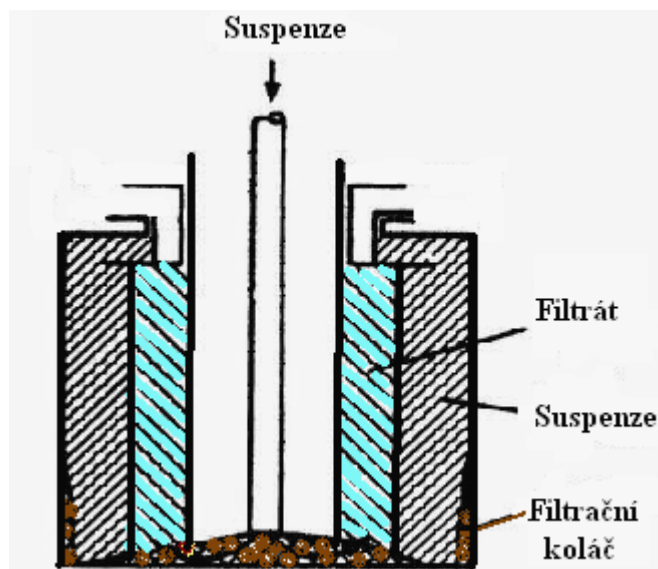
Svíčkový filtr je obvykle vyroben z porézní keramiky. Může pracovat vsádkově i kontinuálně a hodí se k filtraci koncentrovaných suspenzí [26] i zředěných suspenzí s velmi jemnými částicemi [2]. Vlastní těleso filtru je rozděleno přepážkou s vestavěnými filtračními trubkami = svíčkami na dvě části, kde se na filtrační přepážce vytváří filtrační koláč (pracují obdobně jako filtrační listy) [2]. Mohou se jimi filtrovat i znečištěné plyny s prachovými částicemi [9, 26].



Obrázek 27: Svíčkový filtr.

Filtrační odstředivka

Do nádrže s bubnem odstředivky je přiváděna suspenze cyklicky nebo nepřetržitě. Buben odstředivky je zevnitř potažen filtrační tkaninou [2, 4] a uložen na vertikální nebo horizontální hřídeli spojené s motorem [26]. S rostoucí frekvencí otáčení bubnu roste rozdíl tlaků a zlepšuje se odstraňování kapaliny z filtračního koláče [4].

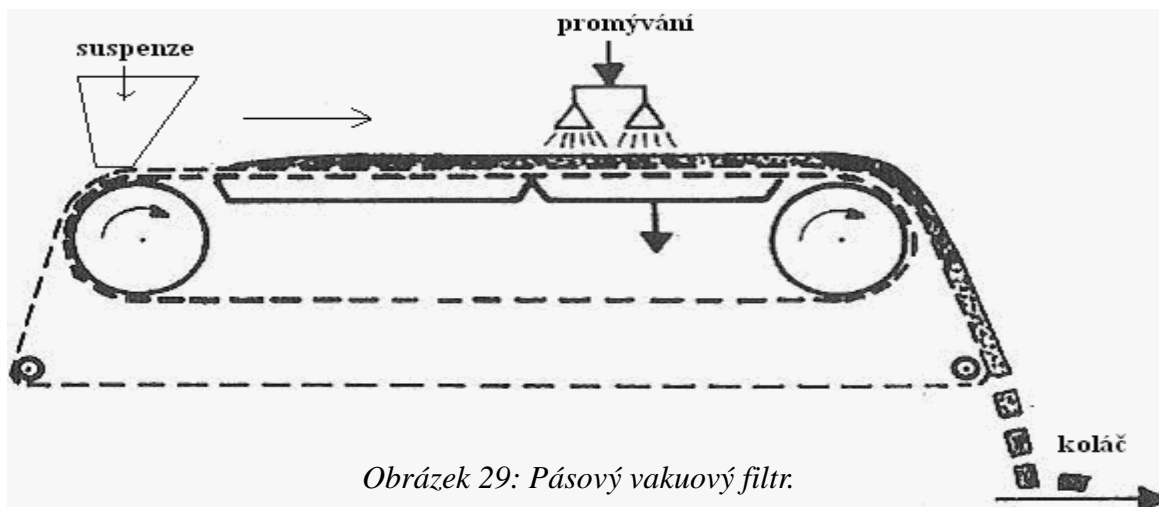


Obrázek 28: Filtrační odstředivka.

2.2.4 Koláčové filtry - kontinuální

Pásový vakuový filtr

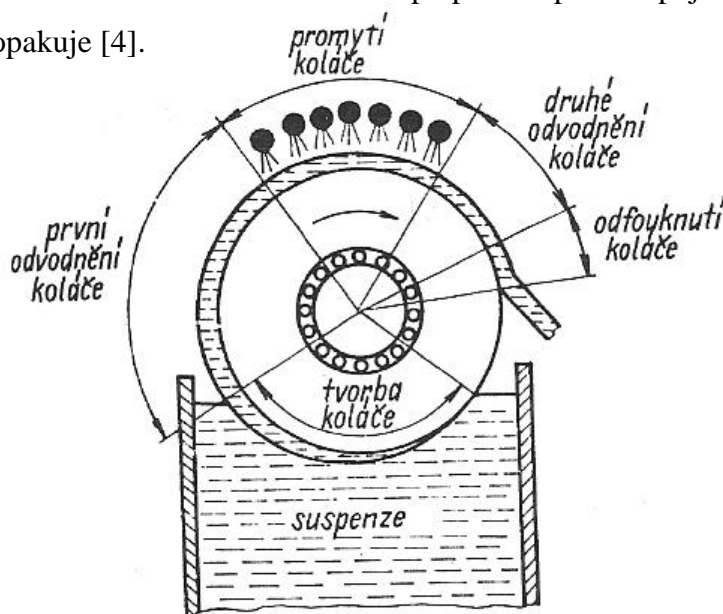
Způsobem prováděné filtrace se pásový filtr podobá bubnovému filtru. Na hnacích a napínacích válcích je napnut děrovaný pryžový pás s drenážním povrchem, k němuž je v horní části připevněna filtrační tkanina [26]. Pod pásem je žlab rozdělený příčnými přepážkami na segmenty, jenž jsou připojeny na vakuum [2].



Obrázek 29: Pásový vakuový filtr.

Rotující filtry - bubnový vakuový filtr

Vlastní povrch bubnu je děrovaný a obvykle potažený kovovou síťkou s filtrační tkaninou. Uvnitř bubnu jsou pevně umístěny komory spojené buď se zásobníkem filtrátu a s vývěvou, nebo s tlakovým vzduchem [26]. Aby celý filtrační cyklus byl kontinuální je část bubnu ponořena do vany s míchadlem, kam se nepřetržitě přivádí suspenze. Vana je napojena na vakuum, které vytváří podtlak pod filtrační přepážkou [2, 29, 30]. Během jedné otáčky bubnu dochází k filtraci, promytí vzniklého filtračního koláče (sprchou), k jeho vysušení a odstranění pomocí nože. Takto očištěná filtrační přepážka opět vstupuje do suspenze a celý proces filtrace se opakuje [4].



Obrázek 30: Bubnový vakuový filtr.

Diskový filtr - kotoučový

V kotoučovém filtru dochází k filtraci (podobně jako u listových filtrů) pomocí řady disků umístěných na společné ose v nádrži se suspenzí, do níž jsou z části ponořené [30], jejich práce je podobná bubnovým filtrům [2]. Mnohem větší filtrační plochy je dosaženo segmentováním vnitřku disků a jejich potažením filtrační tkaninou [30].

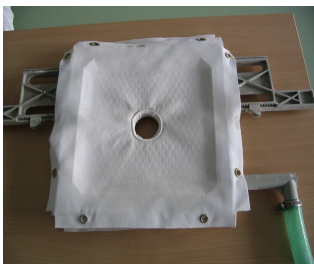


2.2.5 Filtrační lis - kalolis

K separaci tuhé a kapalné fáze se používají filtrační lisy (kalolisy), a to především v průmyslu nebo v ČOV. Využívají metodu tlakové koláčové filtrace, kdy výslednými produkty jsou jako tuhá fáze stlačením vzniklý *filtrační koláč* a jako kapalina vyčištěná od kalu = *filtrát*. Někdy se dále zpracovávají buď oba produkty či jeden z nich slouží jako odpad. V případě dalšího využití filtračního koláče, bývají kalolisy ve zvláštním provedení, kdy na nich lze aplikovat promývání tohoto produktu, za účelem odstranění případných rozpustných látek z tuhé fáze.

Oproti jiným strojním zařízením umožňují filtraci při vysokém filtračním tlaku, čímž lze získat produkt s nejnižším mechanicky dosažitelným zbytkem kapaliny. Vyznačují se velkou filtrační plochou při malé zastavěné ploše a patří mezi cyklicky pracující filtry [2].

2.2.6 Typy kalolisu

Tabulka 6: Charakteristika filtračních kalolisu.

Druh Kalolisu	Filtrační desky	Přívod suspenze, odvod filtrátu	Použití
Komorový 	- zvýšené okraje po obvodu, prostor pro filtrační koláč	- otvory ve středu desek - otvory v dolní části každé desky do boční trubice (otevřený odvod)	odvodňování kalů v průmyslu a v ČOV
Rámový 	- rovné desky s rámy, koláče se tvoří v dutinách ráků	- trubicí procházející všemi deskami a vystupující v čele kalolisu (uzavřený odvod)	potravinářský, chemický průmysl
Membránový 	- po jedné straně koláče pružná membrána, za níž lze přivést tlakové médium a koláč dolisovat	otevřený či uzavřený odvod	v průmyslu, kde jsou zvýšené nároky na odvodnění a minimalizaci odpadů, nebo pro velmi obtížně odvodnitelné kaly

2.2.7 Konstrukční provedení kalolisu

Filtrační lis se skládá z ocelové konstrukce s uzavíracím mechanismem a z filtračních desek potažených textilními plachtami.

Uzavírání kalolisu může být:

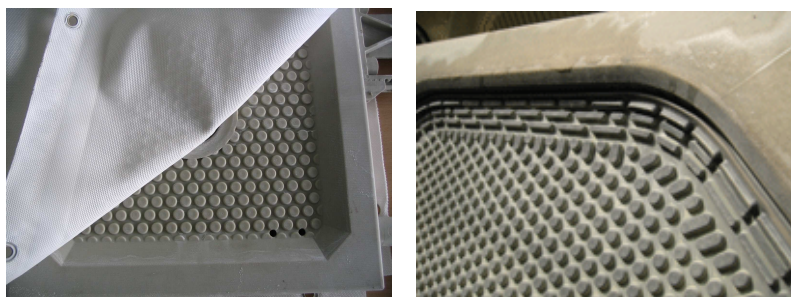
- mechanické (ručně šroubem),

- mechanicko-hydraulické,
- elektro-hydraulické,
- pneumatické, kombinované [32]

Filtrační desky bývají zpravidla čtvercové a dle požadované chemické a teplotní odolnosti mohou být vyrobeny buď z kovových nebo plastových materiálů. K dosažení potřebné účinnosti filtrace je potřeba velká filtrační plocha, ta je zajištěna velkým počtem a rozměrem filtračních desek (u průmyslových kalolisů lze napočítat až sto filtračních desek s rozměry až 2 x 2 m; naproti tomu u laboratorních kalolisů se setkáváme se 6 filtračními deskami s rozměry 300 x 300 mm) [32].

Každá deska je potažena filtrační plachetkou, vyrobenou z textilních vláken typu bavlna, PES, PP, PA (k zajištění chemické odolnosti vůči filtrované suspenzi). Velikost póru plachetky se volí podle koloidního stavu filtrované suspenze. Zároveň se na desce může vyskytovat promývací zařízení, neboli sprcha [32].

Filtrační desky (u komorového kalolisu) i rámy (u rámového kalolisu) mají v rozích otvory, jež při uzavření kalolisu tvoří kanál, jímž protéká suspenze nebo se odvádí filtrát [29] do sběrného žlabu. Desky jsou na povrchu drenážované, což umožňuje stékání a odvádění filtrátu nebo promývací kapaliny takto vzniklými kanálky do výtokových kohoutů [2].



Obrázek 31: Ukázka drážkování komorové filtrační desky.

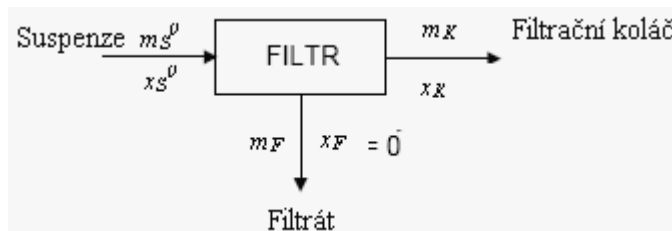
Součástí filtračního zařízení může být i nádrž na suspenzi. Aby bylo zabráněno usazování suspenze v nádrži, může se suspenze míchat elektrickým míchadlem, jež dodává částicím energii pro jejich rovnoměrnou dispergaci, kdy se uvádějí do vlnění, což umožňuje rychlejší procesy přenosu tepla a hmoty. Důležité je umístění, typ a frekvence otáčení míchadla v nádobě, výška hladiny suspenze a rovněž záleží na vestavbách uvnitř nádoby (stěny nádoby mohou být hladké nebo s narážkami). Dle toho má kapalina složku pohybu ve směru otáčení míchadla, tj. tangenciální, která vyvolá odstředivou sílu, je-li míchadlo uloženo uprostřed nádoby s hladkými stěnami [4].

Suspenzi lze do kalolisu dopravovat Membránovým čerpadlem, které je zvláštním druhem pístového čerpadla, kdy pružná membrána kruhového tvaru nahrazuje píst, prohýbá

se v obou směrech, čímž periodicky zvětšuje a zmenšuje objem pracovního prostoru a vytváří tak přetlak (podtlak). Do středu membrány je uchycena ojnice, přenášející mechanickou energii z hnací hřídele na membránu. A dodávaná mechanická energie se mění na potenciální energii kapaliny [29].

2.2.8 Charakteristika koláčové filtrace

Bilance hmotnosti



Obrázek 32: Bilanční schéma filtrace.

$$m_s^0 = m_F + m_k + m_z + m_s'' \quad [\text{kg}] \quad [24] \quad (1)$$

$$m_s^0 x_s^0 = m_k x_k + m_{sz} + m_s'' x_s^0 \quad [\text{kg}] \quad [24] \quad (2)$$

m_s^0 – hmotnost suspenze na počátku [kg]

m_z – celkové ztráty [kg]

m_F – hmotnost filtrátu [kg]

x_s^0 – hmotnostní zlomek pevné látky v

m_k – hmotnost koláče [kg]

suspenzi [-]

m_s'' – hmotnost suspenze po filtraci [kg]

x_k – hmotnostní zlomek pevné látky v

m_{sz} – ztráty pevné látky [kg]

koláči [-]

Hustota suspenze ρ_s^0 [kg.m⁻³] [24]:

$$\rho_s^0 = \frac{m_{ps}}{V_{ps}} = \frac{m_{ps} \rho_v}{m_{p1}} \quad (3)$$

m_{ps} – hmotnost odebraného vzorku suspenze [kg] ve zcela naplněné odměrné baňce

m_{p1} – hmotnost vody [kg] ve zcela naplněné odměrné baňce

V_{ps} – objem odebraného vzorku suspenze [m³] ve zcela naplněné odměrné baňce

ρ_v – hustota vody [kg.m⁻³] při teplotě vody ° C)

Koncentrace suspenze x_s^0 [-] [24]:

$$\frac{1}{\rho_s^0} = \frac{x_s^0}{\rho_s} + \frac{1 - x_s^0}{\rho_v} \quad (4)$$

ρ_s – hustota suché tuhé látky [kg.m⁻³]

Hustota koláče ρ_k [kg.m⁻³] [24]:

$$V_{p1} = \frac{m_{pc} - m_{pk}}{\rho_v} \quad [\text{m}^3] \quad (5)$$

$$V_{pk} = V_p - V_{p1} [m^3] \quad (6)$$

$$\rho_k = \frac{m_{pk}}{V_{pk}} [kg.m^{-3}] \quad (7)$$

V_{p1} - objem vody [m^3] potřebný na doplnění Erlenmayerovy baňky se souborným vzorkem koláče

V_{pk} - objem odebraného souborného vzorku koláče [m^3]

m_{pc} - hmotnost odebraného souborného vzorku koláče [kg] s doplněnou vodou po rysku Erlenmayerovy baňky (1000 ml)

m_{pk} - hmotnost odebraného souborného vzorku koláče [kg]

Koncentrace koláče x_k [-] [24]:

$$\frac{1}{\rho_k} = \frac{x_k}{\rho_s} + \frac{1-x_k}{\rho_v} \quad (8)$$

Filtrační plocha S_F [m^2] [24]:

$$S_F = 2.a.b.n \quad (9)$$

a - výška filtrační desky [m]

n - počet filtračních koláčů [ks]

b - šířka filtrační desky [m]

Tloušťka filtračního koláče L [m] [24]:

$$L = \frac{m_k}{\rho_k \cdot S_F \cdot n} \quad (10)$$

Hmotnost suspenze m_s^0 [kg] [24]:

$$m_s^0 = \rho_s^0 \cdot V_s \quad (11)$$

V_s – objem suspenze na počátku [m^3]

Hmotnost filtrátu m_F [kg]:

$$m_F = V_F \cdot \rho_v \quad (12)$$

V_F – objem filtrátu [m^3]

Vlhkost koláče x_{lk} [-]:

$$x_{lk} = 1 - x_k \quad (13)$$

Objem filtračního koláče V_k [m^3]:

$$V_k = \frac{m_k}{\rho_k} \quad (14)$$

Porozita filtračního koláče ε_k [-]:

$$\varepsilon_k = \frac{1}{1 + \left(\frac{x_k}{1 - x_k} \right) \cdot \left(\frac{\rho_v}{\rho_s} \right)} \quad (15)$$

2.2.9 Kinetika koláčové filtrace

Odvození rychlosti filtrace [2]

Tok vrstvou zrnitého materiálu [28]

Bernoulliho rovnice:

$$\frac{v_1^2}{2} + g \cdot z_1 + \frac{p_1}{\rho} + e_c = \frac{v_2^2}{2} + g \cdot z_2 + \frac{p_2}{\rho} + e_{dis}$$

$$v_1 = v_2, e_c = 0$$

$$\frac{p_1 - p_2}{\rho} = g \cdot h + e_{dis} = g \cdot h + \lambda \left(\frac{l}{d} + \sum_{j=1}^n \frac{l_{ek,j}}{d} \right) \frac{v^2}{2}$$

$$Re = \frac{v \cdot d \cdot \rho}{\eta} \quad [Re \leq 2300]$$

$$\lambda = \frac{64}{Re}$$

Re – Reynoldsovo kritérium

g – gravitační zrychlení

λ – součinitel tření

z_i - vzdálenost

l_{ek} – ekvivalentní délka

h – výška vrstvy

e_{dis} – disipovaná energie

η – dynamická viskozita kapaliny

v – rychlost proudění

ρ – hustota kapaliny

d – průměr

Proudění filtrátu koláčem se popisuje jako tok tekutiny vrstvou zrnitého materiálu:

a) proudění soustavou trubek (jednodušší výklad)

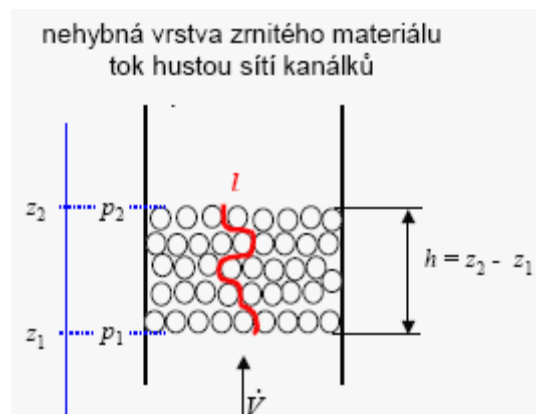
b) obtok soustavy částic (skutečnost) [28].

$$\frac{p_1 - p_2}{\rho} = g \cdot h + \frac{64}{\frac{v_k \cdot d_k \cdot \rho}{\eta}} \frac{l_k}{d_k} \frac{v_k^2}{2} \quad [21, 28] \quad d_k - \text{průměr kanálku, } l_k - \text{délka kanálku}$$

$v_k \approx v$ Rychlost proudění uvnitř kanálku v_k je úměrná mimovrstvové rychlosti v .

$l_k \approx h_k$ Délka kanálku l_k je úměrná tloušťce vrstvy (výšce filtračního koláče) h_k .

$g \cdot h_k$ Zanedbatelný člen (hydrostatický tlak vrstvy).



Obrázek 33: Schéma toku hustou sítí kanálků

$$\frac{p_1 - p_2}{\rho} \approx \frac{32\eta \cdot h_k \cdot v}{\rho \cdot d_k^2} \rightarrow \frac{p_1 - p_2}{\rho} = \frac{\alpha \cdot \eta \cdot h_k \cdot v}{\rho}$$

α [m^{-2}] – měrný odpor filtračního koláče

$$p_1 - p_2 = \alpha \cdot \eta \cdot h_k \cdot v$$

p_1 – tlak na rozhraní koláče a suspenze

p_2 – tlak na rozhraní koláče a přepážky (nevýhodné)

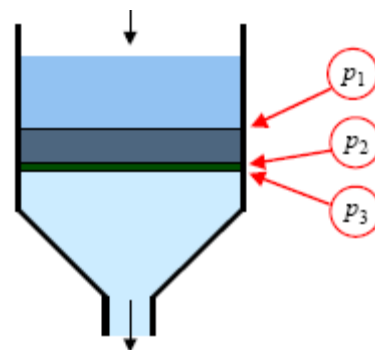
p_3 – tlak za filtrační přepážkou (výhodné)

$$p_1 - p_3 = (\alpha \cdot \eta \cdot h_k + R) v$$

$$R = \alpha \cdot \eta \cdot h'$$

R – odpor filtrační přepážky

Obrázek 34: Rozdělení tlaků ve filtru.



Rychlost filtrace [2]

K určení rychlosti filtrace je nutné znát velikost filtrační plochy filtru S_F [m^2], dobu trvání filtrace τ_F [s] a objem filtrátu získaný za dobu filtrace V_F [m^3].

$$v_F = \frac{1}{S_F} \frac{dV_F}{d\tau_F} = \frac{dq_F}{d\tau_F} [\text{m} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (16)$$

q_F – vyjadřuje objem filtrátu, který od počátku filtrace do daného okamžiku protekl filtrační plochou jednotkové velikosti [2]

$$v_F = \frac{\text{hybná síla}}{\text{odpor filtru}} = \frac{p_1 - p_3}{R_F} = \frac{\Delta p}{R_F} [\text{m} \cdot \text{s}^{-1}] \quad [2, 21] \quad (17)$$

Celkový filtrační rozdíl tlaků Δp je součtem tlakového rozdílu přes filtrační koláč Δp_1 a tlakového rozdílu přes filtrační přepážku Δp_3 [2].

Odpor filtru R_F je součtem odporů filtrační přepážky R a filtračního koláče R_k [2].

Rychlost filtrace má stejnou hodnotu ve filtračním koláči i ve filtrační přepážce.

$$v_F = \frac{\Delta p_1}{R_k} = \frac{\Delta p_3}{R} [\text{m} \cdot \text{s}^{-1}] \quad [2] \quad (18)$$

Velikost odporu filtračního koláče R_k je úměrná jeho tloušťce L , zatímco odpor filtrační přepážky R zůstává konstantní [2].

Tloušťka filtračního koláče je dána podílem jeho objemu V_k a velikosti filtrační plochy S_F [2].

$$\beta = \alpha \cdot h_k \frac{S_F}{V_F} = \alpha \frac{V_k}{V_F} [\text{m}^{-2}] \quad (19)$$

$$\alpha = \frac{\Delta p \cdot V_F}{K_F \cdot V_k \cdot \eta} [\text{m}^{-2}] \quad (20)$$

β – konstanta charakterizující vlastnosti filtračního koláče i suspenze

Měrný odpor filtračního koláče α lze stanovit pouze experimentálně (je funkcí velikosti částic a mezerovitosti filtračního koláče = porozity filtračního koláče ε_K).

Nezávisí-li měrný odpor koláče na tlakovém rozdílu, jedná se o nestlačitelný filtrační koláč (mezerovitost se nemění se změnou tlaku) [2].

Pro filtraci za konstantního tlakového rozdílu byla odvozena rovnice [4]:

$$\frac{1}{S_F} \frac{dV_F}{d\tau_F} = \frac{\Delta p}{\beta \cdot \eta \frac{V_F}{S_F} + R} \quad (21)$$

Integrace za konstantního tlakového rozdílu, kdy: $\tau_F = 0 \quad V_F = 0$

$$\tau_F = \tau_F \quad V_F = V_F$$

$$\frac{\beta \cdot \eta}{S_F^2} \int_0^{V_F} V_F dV_F + \frac{R}{S_F} dV_F = \Delta p \int_0^{\tau_F} d\tau_F \quad (22)$$

$$\frac{1}{2} \left(\frac{V_F}{S_F} \right)^2 + \frac{R}{\beta \cdot \eta} \frac{V_F}{S_F} - \frac{\Delta p}{\beta \cdot \eta} \tau_F = 0 \quad (23)$$

$$K_F = \frac{\Delta p}{\beta \cdot \eta} = \frac{\Delta p \cdot V_F}{\alpha \cdot \eta \cdot V_K} [m^2 \cdot s^{-1}] \quad (24)$$

$$q_M = \frac{R}{\beta \cdot \eta} [m] \quad (25)$$

$$R = q_M \cdot \eta \cdot \alpha \frac{V_K}{V_F} [kg \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}] \quad (26)$$

$$q_F = \frac{V_F}{S_F} [m] \quad (27)$$

$$\underline{\underline{q_F^2 + 2q_M \cdot q_F - 2K_F \cdot \tau_F = 0}} \quad (28)$$

Konstanty filtrační rovnice

K_F je jednou z konstant filtrační rovnice a nabývá konstantní hodnoty pouze za neměnné teploty a konstantní velikosti filtračního rozdílu tlaků. Spolu s druhou konstantou q_M se dá určit experimentálně a platí pouze pro danou suspenzi a filtrační přepážku. K_F závisí na vlastnostech filtračního koláče a filtrované suspenze, viskozitě filtrátu a velikosti filtračního rozdílu tlaků [2].

q_M závisí na vlastnostech filtrační přepážky a není závislá na viskozitě filtrátu; je to objem filtrátu připadající na jednotkovou filtrační plochu, při jehož filtraci vznikne filtrační koláč se stejným odporem jako má filtrační přepážka [2].

Experimentální určení filtračních konstant [33]:

Konstanty filtrační rovnice lze určit kvadratickou regresí (v programu MS Excel nebo Polymath), kde je závisle proměnnou τ_F a nezávisle proměnnou q_F . Úpravou rovnice (28):

$$\tau_F = a_0 + a_1 \cdot q_F + a_2 \cdot q_F^2 \quad (29)$$

$$K_F = \frac{1}{2a_2} \left[m^2 \cdot s^{-1} \right] \quad (30)$$

$$q_M = a_1 \cdot K_F [m] \quad a_0, a_1, a_2 - \text{hodnoty z jištěné z regresní rovnice} \quad (31)$$

$$a_0 = -\frac{q_F^2}{2K_F} - \frac{q_F \cdot q_M}{K_F} + \tau_F \quad \text{grafu } \tau_F = f(q_F) \quad (32)$$

3.1 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST - Sušení

Veškerá experimentální měření této diplomové práce, vztahující se k sušení, byla provedena na laboratorní sušárně dodané a sestavené **Firmou TESUR** a na níž budou dále pracovat studenti procesního inženýrství.

Pro podmínky předmětu Laboratoř-Procesní inženýrství byla všechna měření upravena a optimalizována, tak aby se časově vešla do rozsahu dvou až tří vyučovacích hodin.

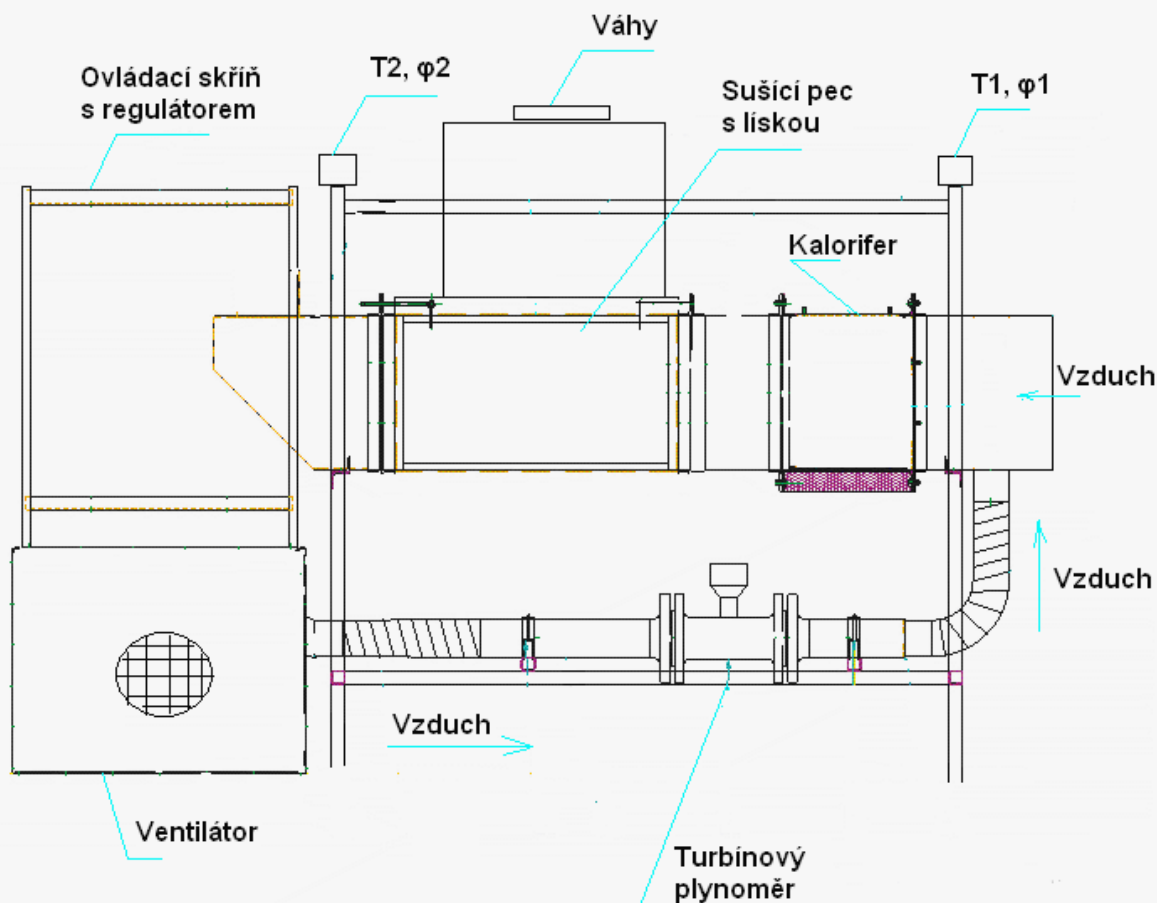
3.1.1 Popis laboratorní sušárny

Schéma laboratorní sušárny je uvedeno na *obrázku 35 a 36*. Součástí laboratorní sušárny je ovládací skříň s multifunkčním měřicím elektroměrem (měří spotřebu elektrické energie a příkony), se světelnou signalizací topení, s ukazatelem nastavené regulované teploty a hodnoty rychlosti proudícího vzduchu. Na levém boku ovládací skříně se nachází hlavní vypínač sušárny.

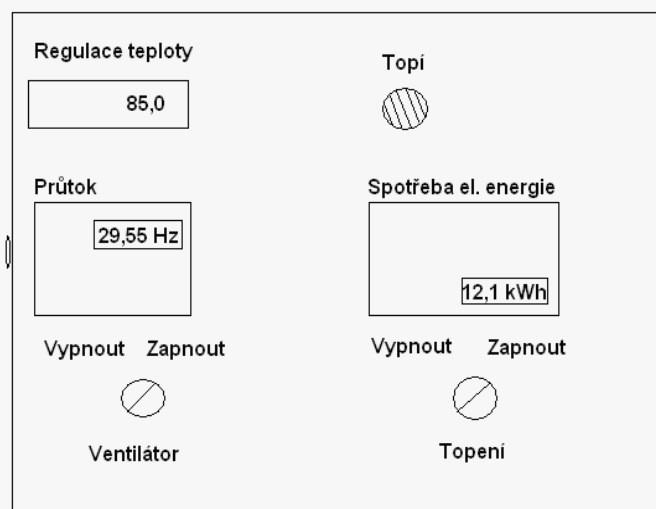
Vzduch v sušárně proudí nastavenou rychlostí z ventilátoru pružnou hadicí do měřicí trati s turbínovým plynoměrem, poté pokračuje do uklidňující komory a následně do kaloriferu, kde se ohřívá na přednastavenou teplotu. Z kaloriferu vchází ohřátý vzduch do vlastní sušicí komory a z ní výstupní komorou vychází ven.

V rámci laboratorní sušárny jsou také k dispozici měřicí čidla = psychometry, měřící okamžitý stav (teplotu a relativní vlhkost) proudícího vzduchu (viz *obrázek 39*). Psychometry mají svá měřicí čidla umístěna před kaloriferem, na uklidňující komoře (tento psychometr měří teplotu vzduchu vstupujícího do sušárny t_1 , respektive teplotu před kaloriferem) a za sušicí pecí, ve výstupní komoře (tento psychometr měří teplotu vystupující ze sušárny t_2 , respektive teplotu suchého vzduchu). Data elektroměrů (panel ovládací skříně, turbínový plynoměr) jsou uchovávána v paměti i po vypnutí elektrického napájení.

Rám vlastní sušící komory má nahoře přišroubovanou desku, na níž se nachází elektrická váha, pomocí které lze zjistit v daném časovém okamžiku momentální stav hmotnosti sušeného materiálu, umístěného na lísce v sušící peci. Tato líska je položena na závěsném systému přišroubovaném na rámu vlastní sušící komory.



Obrázek 35: Schéma laboratorní sušárny.



Obrázek 36: Schéma ovládací skříně s regulátorem.



Obrázek 37: Laboratorní sušárna.



Obrázek 38: Líska s materiálem.



Obrázek 39 – Psychometr sušárny.



Obrázek 40 – Turbínový plynoměr.

3.1.2 Optimalizace pracovních podmínek a postup práce

1. Typ a velikost líska

Firmou TESUR byla dodána líska s rozměry 30 x 40 mm a hmotností 1678 g. Tato líska nebyla vhodná pro sušený materiál, protože dodané váhy mají maximální váživost pouze 2200 g. Z tohoto důvodu byla zakoupena nová nádoba – teflonová o hmotnosti 347 g a s rozměry 20 x 26 mm. Závěsný systém pro umístění nové líska byl upraven vzhledem k jejím rozměrům.

2. Hmotnost suchého materiálu – písku

Pro experimentální měření byl zvolen velice jemný písek, aby byly výsledky experimentálního sušení snadno zpracovatelné a vhodné pro určení I. období sušení, od něhož se odvíjely další výpočty pro stanovení charakteristiky sušárny.

Hmotnost suchého materiálu byla zvolena 0,5 kg vzhledem k maximální váživosti vah a k výšce líska, do které byl suchý písek nasypán a pomocí hmoždíře urovnán na

rovnoměrnou jednolitou plochu. Hmotnost písku byla rovněž volena vzhledem k rychlosti prosušení materiálu tzn., že čím bude nižší vrstva písku na lísce, tím dříve se sušení ukončí.

3. Regulace teploty v laboratorní sušárně

Po zapnutí sušárny hlavním vypínačem na boku ovládací skříně, se odečte hodnota elektrické energie, teplota regulace t_{reg} , teplota t_1 , t_2 a hodnota spotřebovaného vzduchu. Poté se nejprve zapne ventilátor (na 30 s) a následně topení. Sušicí pec se nechá vyhřát na nastavenou teplotu (85° C), které se dosáhne po 20 minutách (viz *Graf 1: Závislost teploty regulace na čase*).

Během této doby se po každých dvou minutách odečítají měřené hodnoty:

- na ovládací skříně s regulátorem t_{reg} a
- na psychometrech sušárny t_1 , t_2 .

Regulátor teploty i průtok vzduchu jsou již nastaveny.

Správná regulace teploty v sušárně byla ověřena rtuťovým teploměrem vloženým dovnitř sušárny.

Nastavená teplota sušárny se pohybovala od 60° do 85° C. Jako optimální teplota pro sušení materiálu byla zvolena teplota 85°C. Tato teplota je maximálně možná nastavitelná teplota sušárny. V případě potřeby zvýšení rychlosti sušení odpadá možnost nastavení vyšší regulované teploty k vyhřátí sušicí pece a k ohřevu vzduchu, neboť je již nastavena maximální blokováná teplota na 90° C a havarijní teplota je nastavena na 100° C, vyšší teploty již dosáhnout nelze. Při překročení havarijní teploty se regulace dostane do poplachového režimu, spustí se alarm a regulátor sám vypne topení.

K potřebnému vyhřátí sušárny na nastavenou regulovanou teplotu sušárny byla měření zjištěna minimální doba vytopení sušárny, tj. 20 min (viz *Graf 1: Závislost teploty regulace na čase*).

4. Objem kapaliny – vody

Jako nejvhodnější kapalina pro navlhčení písku byla zvolena voda o určitém objemu (viz *tabulka 7*). Vzhledem k váživosti vah a k časovému rozvržení budoucího vyučovaného předmětu: Laboratoř – procesního inženýrství byl z proměřovaných objemů vody zvolen jeden, konkrétně 60 ml a pro tento objem kapaliny byla provedena opakovaná měření, za účelem výpočtu chyby vznikající při měření. Tato opakovaná měření jsou v *tabulce 7* barevně zvýrazněna.

5. Navlhčení

Rovnoměrné nalití malého objemu vody po celé ploše lísky bylo velmi obtížné a proto se pro rovnoměrné pokrytí písku vodou zvolil rozprašovač. (*obrázek 42*). Hmotnost pevného

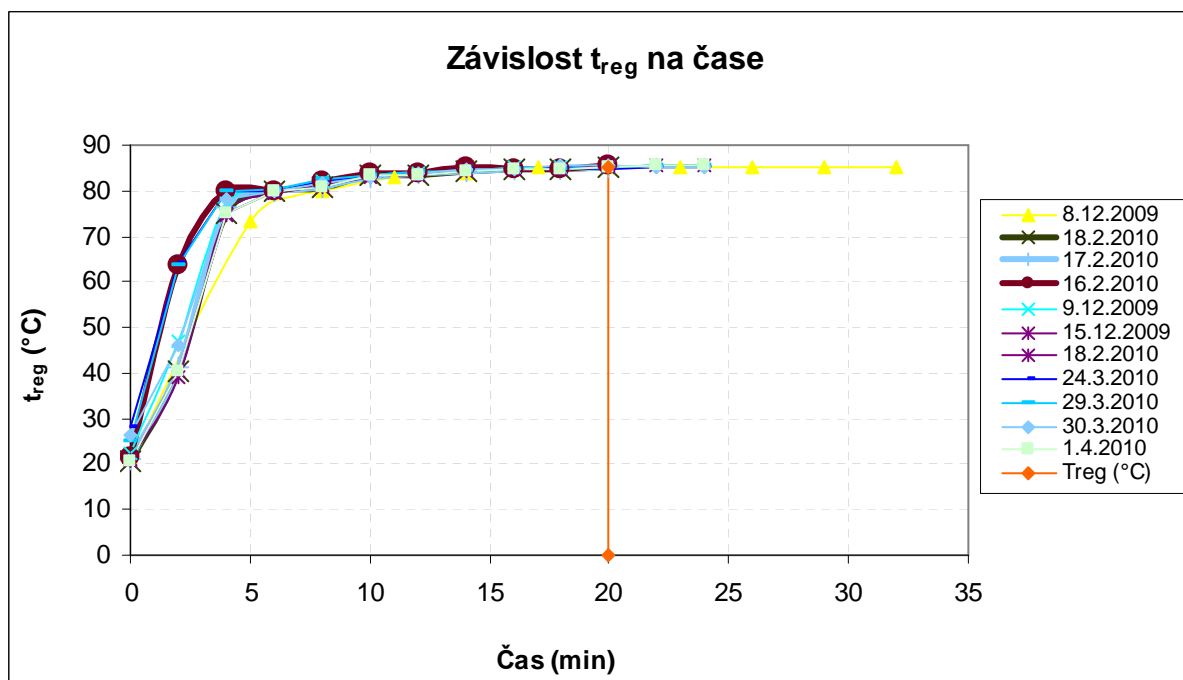
materiálu se upraví na stanovenou hodnotu a pomocí hmoždíře se jeho povrch na lísce urovná. Do kádinky (150 ml) se nalije určený objem kapaliny a rozprašovačem se rovnoměrně nanese na připravený suchý materiál na lísce.

Navlhčení materiálu se provádí až po vyhřátí sušárny. Po této přípravě se pokračuje vytárováním elektrických vah, vložením lisky s vlhkým materiálem do sušárny a okamžitým odečtením měřených hodnot pro čas nula minut i zapnutím stopek.

6. Měření barometrického tlaku

K výpočtům bylo potřeba změřit hodnotu barometrického tlaku v laboratoři. K tomuto účelu byl dokoupen psychrometr – laboratorní vlhkoměr/teploměr/barometr (viz *obrázek 42*).

Pomocí tohoto přístroje byly rovněž na počátku a konci měření odečteny další měřené hodnoty, přestože k výpočtům využívány nebyly (viz *Tabulka 1 – Podmínky laboratoře* ve vzorovém protokolu).



Graf 1: Závislost teploty regulace na čase.



Obrázek 41: Rozprašovač.



Obrázek 42: Laboratorní psychometr.

7. Vlastní měření

Před začátkem vlastního měření jsem pomocí laboratorního psychometru zjistila počáteční hodnotu barometrického tlaku. Další měřené hodnoty jsem odečítala a zapisovala do předtiskuté tabulky každých pět minut, kdy je důležité dodržet tento časový interval hlavně pro hmotnost lísky, až poté lze odečíst hodnoty t_2 , φ_2 , t_{reg} , *elektrickou energii*, t_1 , φ_1 . Experimentální sušení jsem ukončila, když hmotnost lísky s pískem v sušárně byla menší než 0,5 g za 5 minut.

Po ukončení měření jsem vypnula topení, otevřela se pec a vyjmula lísku s již suchým materiálem. Ventilátor se vypíná, když teplota na výstupu ze sušárny t_2 klesne pod 40° C. Opět jsem odečetla hodnotu barometrického tlaku, elektrické energie a průtoku vzduchu = *konečné hodnoty* (k vlastním výpočtům se používá průměrná hodnota barometrického tlaku, zjištěná na počátku a konci měření). Nakonec se vypne hlavní vypínač sušárny

3.1.3 Zpracování naměřených hodnot

Dle rovnice (9) se vypočítá relativní hmotnostní zlomek vlhkosti X_A a sestrojí se graf závislosti obsahu vlhkosti v materiálu na době sušení, tzv. *křivka sušení*. V tomto grafu se vyznačí tři období sušení (viz *Graf 2: Závislost obsahu vlhkosti v materiálu na čase*).

1. Vymezení prvního období sušení

I. období sušení je lineární částí grafu křivky sušení a poslední hodnota tohoto období je kritická vlhkost X_{AC} . Časový interval $d\tau$ pro tuto lineární oblast odpovídá délce prvního období sušení τ_I . Lineární část závislosti $X_A(\tau)$ se získá postupnou eliminací bodů křivočaré části grafu a z této lineární oblasti se metodou nejmenších čtverců vypočítá směrnice přímky, ze které se dle rovnice (13) určí průměrná rychlost sušení v prvním období Φ_{AI} .

Dle rovnice (12) se vypočítá rychlost sušení pro libovolný časový interval a sestrojí se graf závislosti rychlosti sušení na obsahu vlhkosti v materiálu, tzv. *rychlostní křivka*. Do tohoto grafu se zaneše hodnota kritické vlhkosti X_{AC} a opět se vymezí tři období sušení (viz *Graf 3: Závislost rychlosti sušení na obsahu vlhkosti v materiálu*). Další výpočty se vztahují jen k I. období sušení.

1. Zjištění hodnot potřebných pro výpočty

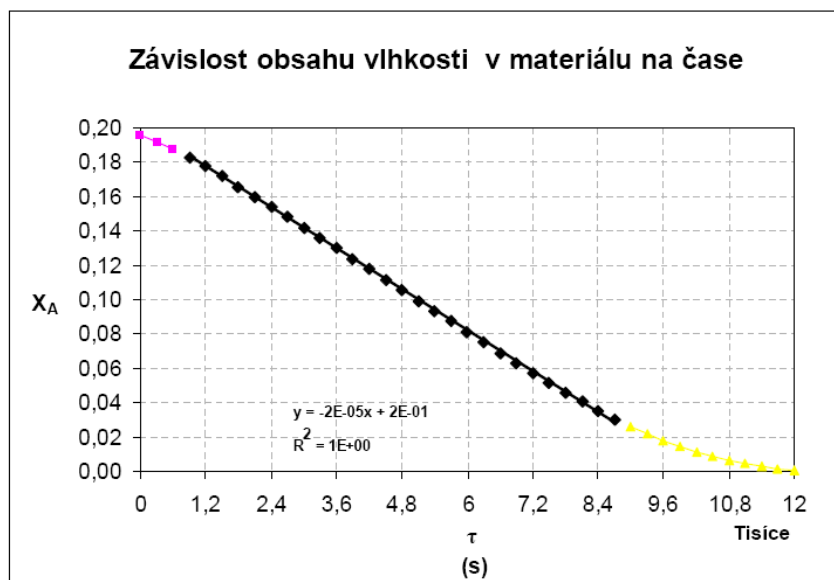
V entalpickém diagramu vlhkého vzduchu lze odečíst pomocí dvou známých hodnot t_i , φ_i vlhkého vzduchu (průměrné hodnoty za I. období sušení) bod odpovídající jeho stavu a určit tak všechny ostatní parametry vlhkého vzduchu. Pomocí přibližných vztahů (3) až (7) se zjištěné hodnoty z entalpického diagramu zkorigují výpočtem a tyto vypočítané hodnoty se dále použijí pro další stanovení charakteristik procesu sušení (viz *tabulka 7 – 9*).

Zaokrouhlování

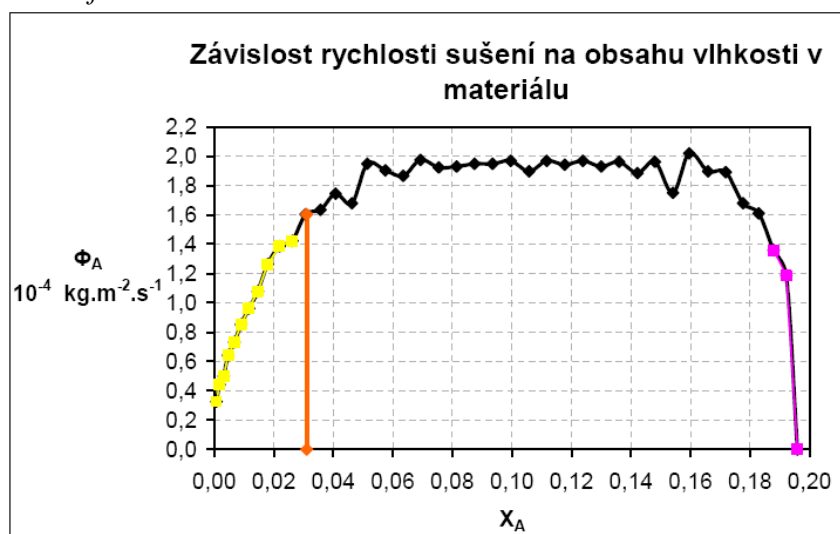
Jelikož váha sušárny váží s přesností na 0,01 g odečítají se měřené hodnoty hmotnosti vždy bez zaokrouhlování na celá čísla, za účelem přesného zjištění I. období sušení a realizování grafů.

Výsledky se zpracují pomocí programu MS Excel a zde se zaokrouhlí na tři desetinná místa, avšak program MS Excel stále počítá s původními nezaokrouhlenými hodnotami, jež se do tabulky zanesou. Takto vypočítané výsledky se dále vyhodnotí a uvedou do protokolu, proto se může případné přepočítání hodnot z protokolu na kalkulačce mírně lišit od vypočítaných hodnot pomocí MS Excel.

Některé určované parametry vlhkého vzduchu z entalpického diagramu je rovněž potřeba zaokrouhlit s přesností na tři platné číslice [23]. Vypočítané chyby měření jsou uvedeny v *tabulce 10*.



Graf 2: Závislost obsahu vlhkosti v materiálu na čase.



Graf 3: Závislost rychlosti sušení na obsahu vlhkosti v materiálu.

Výpočet chyby z opakovaných měření

Aritmetický průměr \bar{x} vypočtený z n hodnot:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = \frac{1}{8} (0,50002 + 0,50001 + 0,50027 + 0,50021 + 0,50012 + 0,50047 + 0,50007)$$

$$\bar{x} = \underline{\underline{0,50017 \text{ kg}}}$$

Výběrový rozptyl s_x^2

$$s_x^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1} = \frac{1,64 \cdot 10^{-7}}{7} = \underline{\underline{2,34 \cdot 10^{-8} \text{ kg}}}$$

Výběrová směrodatná odchylka s_x

$$s_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} = \sqrt{2,34 \cdot 10^{-8}} = \underline{\underline{1,53 \cdot 10^{-4} \text{ kg}}}$$

Směrodatná odchylka aritmetického průměru $s_{\bar{x}}$

$$s_{\bar{x}} = \frac{s_x}{\sqrt{n}} = \frac{1,53 \cdot 10^{-4}}{\sqrt{8}} = \underline{\underline{5,41 \cdot 10^{-5} \text{ kg}}}$$

Konečná výsledná hodnota měření m_c s vyznačením přesnosti výsledku

$$\bar{x} \pm s_{\bar{x}} = \underline{\underline{0,50017 \pm 5,41 \cdot 10^{-5} \text{ kg}}}$$

Tabulka 7: Souborná tabulka naměřených a vypočtených hodnot.

Číslo měření	τ [s]	t_1 [°C]	t_2 [°C]	t_3 [°C]	t_w [°C]	t_D [°C]	ϕ_1 [%]	ϕ_2 [%]	$dx_A/d\tau$	m_C [kg]	m_{A0} [kg]	m_{AI} [kg]	m_{BI} [kg]	x_{AC} [-]	Q_V [m³/hod]	V [ml]	p_B [Pa]
1	11100	27,7	54,3	68	25,4	12,1	28,7	9,5	-1,00E-05	0,50018	0,09213	0,0789	357,972	0,020	102	100	99360
2	7800	28,4	63,6	85	29,0	15,9	29,3	7,9	-2,00E-05	0,50015	0,09797	0,0758	247,920	0,031	102	100	98260
3	6000	27,5	65,9	85	29,5	16,0	24,7	6,8	-2,00E-05	0,50013	0,09334	0,0704	213,721	0,035	114	100	97890
4	3600	27,3	66,1	85	29,8	16,1	26,5	6,9	-2,00E-05	0,50011	0,05164	0,0374	129,399	0,022	114	50	98845
5	4500	26,9	65,8	85	28,3	13,5	18,0	5,7	-2,00E-05	0,50004	0,07002	0,0505	161,892	0,032	114	70	98535
6	3900	27,8	66,1	85	29,1	14,2	20,7	6,1	-2,00E-05	0,50006	0,06179	0,0435	138,372	0,026	114	70	97510
7	3600	27,1	66,1	85	29,6	15,8	28,5	6,9	-2,00E-05	0,50002	0,05909	0,0380	126,918	0,032	114	60	96915
8	3600	26,6	65,8	85	28,7	13,8	23,9	6,2	-2,00E-05	0,50001	0,05659	0,0379	127,158	0,027	114	60	96735
9	3600	28,9	66,7	85	29,2	14,2	19,9	6,1	-2,00E-05	0,50027	0,05718	0,0395	128,746	0,024	114	60	98710
10	3900	27,7	66,2	85	29,2	15,0	25,1	6,7	-2,00E-05	0,50021	0,05870	0,0419	138,569	0,023	114	60	97765
11	3300	30,6	67,5	85	29,8	15,8	21,1	6,5	-2,00E-05	0,50021	0,05374	0,0366	115,323	0,023	114	60	97125
12	3600	25,5	65,1	85	28,8	13,8	25,0	6,3	-2,00E-05	0,50012	0,05631	0,0371	128,995	0,028	114	60	97785
13	3300	28,7	66,3	85	29,0	14,2	22,6	6,3	-2,00E-05	0,50047	0,05436	0,0360	117,004	0,026	114	60	97855
14	3600	28,0	66,3	85	28,8	13,3	20,0	5,8	-2,00E-05	0,50007	0,05506	0,0393	128,066	0,020	114	60	97880

Tabulka 8: Souborná tabulka naměřených a vypočtených hodnot – pokračování 1.

Číslo měření	Y_{A1} [-]	Y_{A2} [-]	naměř. Y_{AW} [-]	vyp. Y_{AW} [-]	naměř. p_A [Pa]	vyp. p_A [Pa]	naměř. p_{AW} [Pa]	vyp. p_{AW} [Pa]	l [-]	ρ_{vlvz} [kg/m ³]	α [W/m ² .K]	z relace α [W/m ² .K]	K_Y [kg/m ² .s]	$K_p \cdot 10^{-8}$ [kg/m ² .Pa]
1	0,00683	0,00867	0,0207	0,0208	1417	1366	3250	3210	4538,851	1,146	11,537	11,634	0,011	7,453
2	0,00730	0,01120	0,0257	0,0258	1817	1738	4000	3914	3272,599	1,130	13,115	13,253	0,013	8,555
3	0,00567	0,01130	0,0263	0,0267	1833	1747	4167	4025	3037,453	1,131	15,048	15,441	0,015	9,665
4	0,00610	0,01170	0,0270	0,0271	1850	1825	4250	4122	3457,875	1,142	13,352	13,429	0,013	8,329
5	0,00433	0,00900	0,0250	0,0248	1500	1405	3917	3776	3207,370	1,141	13,976	13,960	0,014	8,926
6	0,00467	0,00970	0,0253	0,0253	1666	1497	3967	3808	3180,026	1,126	14,096	14,083	0,014	9,325
7	0,00600	0,01100	0,0263	0,0264	1833	1684	4167	3947	3338,055	1,120	13,538	13,626	0,013	8,702
8	0,00500	0,00963	0,0250	0,0252	1583	1475	3917	3772	3354,956	1,121	13,280	13,486	0,013	8,675
9	0,00500	0,01000	0,0260	0,0258	1667	1562	4000	3931	3261,044	1,135	13,664	13,504	0,013	9,040
10	0,00533	0,01070	0,0260	0,0263	1750	1653	4000	3968	3311,031	1,128	13,553	13,837	0,013	9,172
11	0,00583	0,01100	0,0270	0,0269	1750	1688	4167	4029	3153,846	1,110	13,756	13,671	0,013	8,816
12	0,00483	0,00983	0,0253	0,0251	1667	1521	4000	3794	3475,369	1,137	13,308	13,126	0,013	8,497
13	0,00567	0,01000	0,0257	0,0257	1667	1548	4000	3884	3254,481	1,126	13,656	13,671	0,013	8,979
14	0,00500	0,00933	0,0255	0,0251	1583	1447	4000	3797	3261,358	1,129	13,611	13,273	0,013	8,679

Tabulka 9: Souborná tabulka naměřených a vypočtených hodnot – pokračování 2.

Číslo měření	$\Phi_{AI} \cdot 10^{-4}$ [kg/m ² .s]	C_{pg} [J.Kg ⁻¹ .K ⁻¹]	$K_P \cdot 10^{-8}$ [kg/m ² .Pa]	Q_I [J]	Q_T [J]	Q_{SK} [J]	Δh_v [J/kg]	naměř. I_1 [J/kg]	vyp. I_1 [J/kg]	naměř. I_2 [J/kg]	vyp. I_2 [J/kg]	η_1 [%]	η_2 [%]
1	1,366	1021,705	7,410	192535	11405403	14760000	2441214,0	44538	45284	76154	77145	1,7	1,3
2	1,868	1026,775	8,583	184302	11419443	14400000	2432827,4	46154	47196	92692	93257	1,6	1,3
3	2,255	1027,023	9,900	171096	11505670	13320000	2431660,1	41538	42122	95385	95957	1,5	1,3
4	1,999	1027,808	8,703	90975	6992334	7920000	2431076,2	42462	43015	96538	97052	1,3	1,1
5	2,157	1022,539	9,098	122885	8368036	10080000	2434577,2	37300	38097	88846	89786	1,5	1,2
6	2,146	1023,909	9,284	105849	7197696	8280000	2432594,0	40000	39877	91250	91894	1,5	1,3
7	2,031	1026,444	8,975	92447	6693782	7920000	2431426,5	41250	42557	94167	95298	1,4	1,2
8	2,025	1023,767	8,814	92234	6599882	7920000	2433527,5	38333	39501	90000	91404	1,4	1,2
9	2,109	1024,507	8,902	96030	6625140	7920000	2432360,5	41600	41835	92800	93294	1,4	1,2
10	2,064	1025,861	8,914	101799	7365774	8640000	2432430,6	41600	41459	94400	94615	1,4	1,2
11	2,131	1026,478	9,102	88894	5887585	7200000	2431076,2	44800	45681	96800	96734	1,5	1,2
12	1,983	1024,141	8,723	90316	6870274	8280000	2433294,2	39200	37951	92800	91211	1,3	1,1
13	2,095	1024,499	8,969	87464	5796729	6840000	2432827,4	42400	43342	93600	92885	1,5	1,3
14	2,098	1023,192	8,926	95550	6417003	7920000	2433294,2	40800	41023	91600	91130	1,5	1,2

Tabulka 10: Vypočítané chyby z opakovaných měření

Měřená hodnota x_i	Aritmetický průměr \bar{x}	Výběrový rozptyl s_x^2	Výběrová směrodatná odchylka s_x	Směrodatná odchylka aritmetického průměru $s_{\bar{x}}$	Konečný výsledek $\bar{x} \pm s_{\bar{x}}$
m_C [kg]	0,50017	2,34E-08	1,53E-04	5,41E-05	0,50017±5,41E-05
m_{A0} [kg]	0,05638	3,74E-06	1,93E-03	6,84E-04	0,05638±6,84E-04
m_{AI} [kg]	0,03829	33,61E-06	1,90E-03	6,72E-04	0,03829±6,72E-04
m_{BI} [kg]	126,347	5,36E+01	7,32	2,59	126,347±2,59
x_{AC} [-]	0,025	1,37E-05	3,70E-03	1,31E-03	0,025±1,31E-03
Y_{A1} [-]	0,00533	1,99E-07	4,46E-04	1,58E-04	0,00533±1,58E-04
Y_{A2} [-]	0,01019	4,04E-07	6,36E-04	2,25E-04	0,01019±2,25E-04
l [-]	3301,268	8,83E+03	9,39E+01	3,32E+01	3301,268±3,32E+01
ρ_{vlvz} [kg/m³]	1,126	7,59E-05	8,71E-03	3,08E-03	1,126±3,08E-03
α [W/m².K]	13,546	2,88E-02	1,70E-01	6,00E-02	13,546±6,00E-02
z relace α [W/m².K]	13,524	5,35E-02	2,31E-01	8,18E-02	13,524±8,18E-02
Φ_{AI}.10⁻⁴ [kg/m².s]	2,07E-04	1,48E-11	3,85E-06	1,36E-06	2,07E-04±1,36E-06
η₁ [%]	1,4	5,00E-03	7,07E-02	2,50E-02	1,4±2,50E-02
η₂ [%]	1,2	2,86E-03	5,35E-02	1,89E-02	1,2±1,89E-02
C_{pg} [J.Kg⁻¹.K⁻¹]	1024,861	11,55	1,25	4,41E-01	1024,861±4,41E-01
K_P.10⁻⁸ [kg/m².Pa]	8,916	1,27E-02	1,13E-01	3,98E-02	8,916±3,98E-02
Q_I [J]	93092	2,12E+07	4,61E+03	1,63E+03	93092±1,63E+03
Q_T [J]	6532021	2,60E+11	5,10E+05	1,80E+03	6532021±1,80E+03
Q_{SK} [J]	7830000	3,24E+11	5,69E+05	2,01E+05	7830000±2,01E+05
Δh_v [J/kg]	2432529,6	8,03E+05	8,96E+02	3,17E+02	2432529,6±3,17E+02
vyp. I₁ [J/kg]	41669	5,53E+06	2,35E+03	8,31E+02	41669±8,31E+02
vyp. I₂ [J/kg]	93321	4,34E+06	2,08E+03	7,36E+02	93321±7,36E+02

3.2 Experimentální část – Filtrace

Veškerá experimentální měření této diplomové práce, vztahující se k filtraci, byla provedena na laboratorním filtračním zařízení dodaném a sestaveném **Firmou ANTARES** na němž budou dále pracovat studenti procesního inženýrství.

Pro podmínky předmětu Laboratoř-Procesní inženýrství byla všechna měření upravena a optimalizována, tak aby se časově vešla do rozsahu dvou až tří vyučovacích hodin.

3.2.1 Popis laboratorního filtračního zařízení

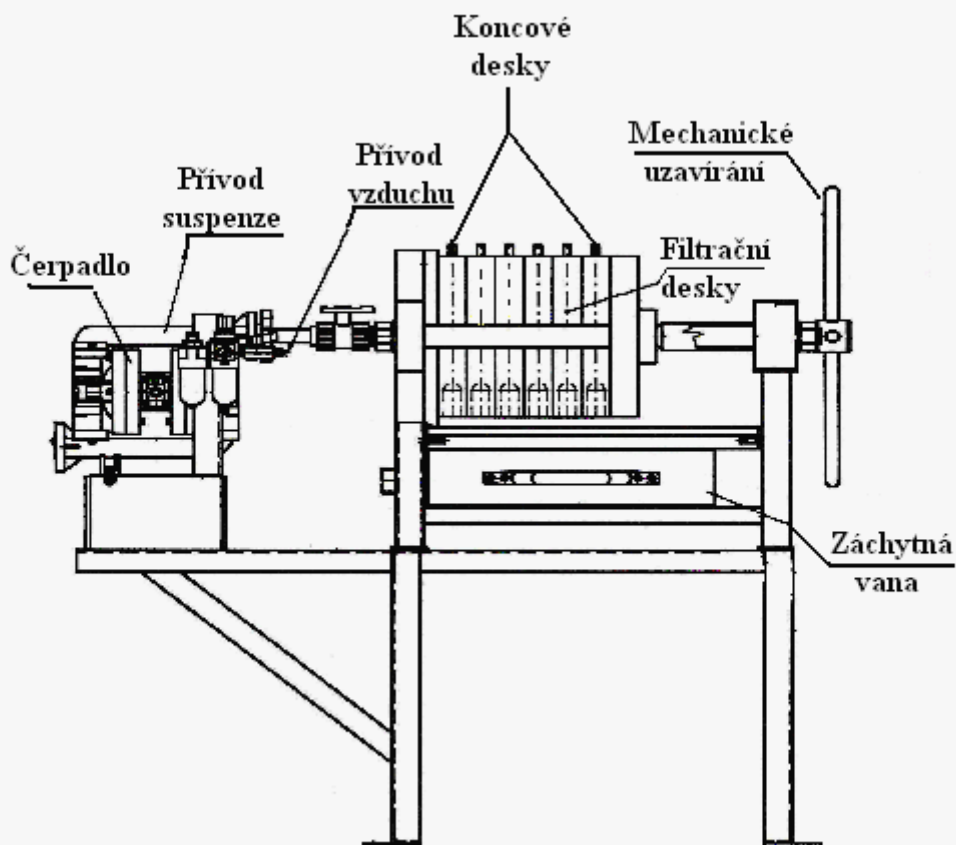
Schéma laboratorního kalolisu je na *obrázku 43*. Součástí filtračního zařízení je nádrž pro suspenzi o objemu 100 l, uzavřená víkem (viz *obrázek 44*). Uvnitř nádrže se nalézá míchadlo poháněné elektrickým motorem s nastavenou frekvencí otáčení míchadla. Nádrž má ve své dolní části výpust pro odvod suspenze, napojenou na potrubí na sání objemového čerpadla, které je poháněné vzduchem z kompresoru. Výpust nádrže lze otevřít nebo uzavřít pomocí kulového regulačního kohoutu. Z čerpadla pokračuje výtlačné potrubí do kalolisu, kde je před vstupem do kalolisu možné odebírat suspenzi pro stanovení její koncentrace před samotnou filtrací.

Přetlak na vstupu do kalolisu se měří manometrem umístěným v blízkosti čerpadla. Přetlak je zároveň rozdílem tlaků Δp při filtraci, nastavený na konstantní hodnotu 0,4 MPa.

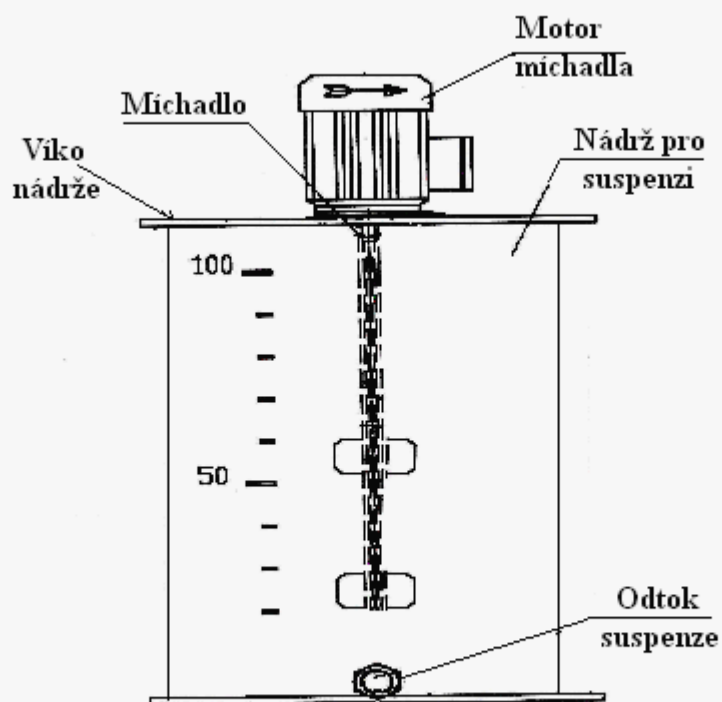
Uvnitř kalolisu je 6 desek (o rozměru 300 x 300 mm) určených k filtraci, z nichž 2 desky jsou koncové a 4 komorové filtrační desky. Každá deska je opatřena filtrační plachetkou a povrch desek je drážkovaný sloužící k usměrnění odvodu filtrátu do výtokového kohoutu na boční straně desky. Kalolis se uzavírá mechanicky šroubem v jeho boční části.

Filtrát vytéká vývody ve filtračních deskách do žlabu, odkud dále pokračuje potrubím s regulačními kohouty do odměrné nádoby (o objemu 10 l). Na jedno z potrubí pro odvod filtrátu je napojeno také potrubí s možností směřování vtoku filtrátu do nádrže na suspenzi. Napouštění nádrže, případně čištění filtračního zařízení se děje pomocí hadice připojené k vodovodnímu potrubí.

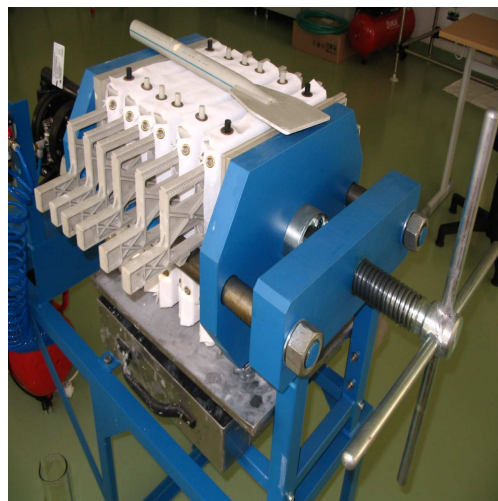
Na rámu kalolisu je i vysouvateľná záchytná vana pro filtrační koláč, přikrytá víkem sahajícím až do žlabu pro odvod filtrátu. Víko vany slouží k zachytu úkapů filtrátu během filtračního procesu.



Obrázek 43: Schéma laboratorního kalolisu – komorového.



Obrázek 44: Schéma filtrační nádrže pro suspenzi.



Obrázek 45: Náhled laboratorního komorového kalolisu.

3.2.2 Průběh filtrace na kalolisu

Příprava kalolisu před filtrací

Ověření správného sestavení kalolisu bylo provedeno tlakovou zkouškou před každou činností kalolisu. Nejprve byla nutná kontrola správného uložení plachetek na filtračních deskách, které nesměly být přeložené ani špinavé nebo poškozené. Posouvání desek se konalo vždy po jednom kusu, rovněž se zkontrolovalo správné uložení desek, tj. všechny musely být natočeny výtokem do žlabu a s uložení potřebného počtu filtračních desek (s černými výstupy v horní části desky) mezi tzv. koncové desky (s bílými výstupy v horní části desky).

Uzavíracím šroubem se lis uzavřel závěrnou ocelovou deskou. Pod filtračními deskami musela být podsunuta vana s víkem (má dvojí funkci, v první fázi filtrace zadržuje úkapy, tj. s víkem a ve druhé fázi slouží k zachytu filtračních koláčů, tj. bez víka).

Otevřel se kohout pro vstup kapaliny do kalolisu, kohout na sání a kohout pro výstup kapaliny, pod kterým byla připravena nádoba pro tuto vytékající kapalinu. Ostatní kohouty byly uzavřeny. Tlaková zkouška se provedla pomocí čisté vody napuštěné, do k tomu určené nádoby, z vodovodního potrubí. Spustil se kompresor a pomalým otevíráním kohoutu čerpadla se sledoval jeho rozběh a ustálení na konstantní hodnotu tlaku (0,4 MPa).

Správně sestavený kalolis je těsný a voda z prostoru mezi deskami nevytéká. Jsou přípustné pouze malé úniky kapaliny, které zmizí po zaplnění desek filtračním koláčem během filtrace. Netěsní-li kalolis, je potřeba jej po ukončení tlakové zkoušky a po jeho odtlačování, otevřít, opět urovnat desky a pevně utáhnout uzavíracím šroubem. Celý postup tlakové zkoušky zopakovat.

Příprava suspenze

K filtraci byla určena suspenze připravená již při předešlém měření. Objem suspenze se kontroloval na stavoznaku zásobní nádrže při vypnutém míchadle.

Zabránění usazování suspenze

Suspenze v nádrži s hladkými stěnami byla před začátkem samotné filtrace a během filtrace míchána elektrickým míchadlem. Míchání před začátkem filtrace probíhalo při uzavřené armatuře výtoku suspenze z nádrže (nejméně 5 minut). Míchadlo je uloženo uprostřed nádoby a pro efektivní míchání suspenze je jeho hřídel opatřena lopatkovými zarážkami, a to uprostřed a na konci hřídele.

Zjištění koncentrace suspenze [24]

Po provedení tlakové zkoušky a po zhomogenizování suspenze, se uzavřel kohout pro vstup suspenze do kalolisu a otevřel se výtokový kohout z nádrže a kohout pro výtok suspenze z potrubí. Spustil se kompresor a čerpadlo, část suspenze se nechala odtéct do připravené nádoby a poté se naplnila až po okraj předem zvážená (nebo vytárovaná) odměrná baňka. Hmotnost m_{ps} takto naplněné odměrné baňky vzorkem suspenze byla důležitá ke stanovení koncentrace suspenze x_s^0 dle rovnice (4), za předpokladu aditivity objemů, kdy se hustota suspenze stanovila pyknometricky dle vztahu (3). Změřila se teplota a hmotnost vody m_{pl} ve zcela zaplněné odměrné baňce (150 ml). V chemicko-inženýrských tabulkách se našla pro zjištěnou teplotu vody její hustota ρ_v a vypočítal se odpovídající objem V_{ps} odebraného vzorku suspenze.

Zapnutí čerpadla

Vzduchomembránové objemové čerpadlo bylo poháněno stlačeným vzduchem z kompresoru. Vzduchový rozvod membránového objemového čerpadla je asi jedna kapka oleje za pět minut. Při prvním spouštění čerpadla a při nezahlném sacím potrubí kapalinou se snížil tlak přiváděného vzduchu redukčním šroubem (ruční armaturou), tzn. že se sání čerpadla spouštělo velmi pomalu. Není doporučen chod čerpadla naprázdno déle než několik sekund, jinak dojde ke zvýšenému namáhání a opotřebení membrány v čerpadle.

Filtrace

Po zjištění koncentrace suspenze se veškerá suspenze, která vytekla do nádoby a suspenze z odměrné baňky, vrátila zpět do nádrže. Filtrace se prováděla při zapnutém míchadle, otevřeném kohoutu pro výtok suspenze z nádrže, pro přívod suspenze do kalolisu a pro výstup filtrátu do připravené nádoby. Ostatní kohouty byly uzavřeny. S prvním průtokem filtrátu se zapnuly stopky, zahájilo se měření času a objemu filtrátu (každých 9 litrů se zapisovala hodnota na stopkách). Celkový objem filtrátu byl potřebný do hmotnostní bilance

(1) a jeho závislost na čase potřebná pro stanovení konstant filtrační rovnice K_F , q_M .

Doprava kalu

Čerpadlo nasávalo a dopravovalo suspenzi do vlastního tělesa kalolisu = do komor. Tuhé částice se usazovaly na filtrační plachetce, neboť její póry byly menší než tyto částice, ale vhodné pro průtok čistého filtrátu, který stékal po drážkovaném povrchu desek do jejich otvorů v dolní části a vytékal do svodového žlabu a dále potrubím do připravené nádoby o objemu 10 litrů.

Nárůst filtračního koláče

Vrstva kalu, která se usazovala v komorách zvyšovala hydraulický odpor kapaliny, což bylo kompenzováno nárůstem tlaku, který se udržoval konstantní až do konce filtrace, naopak průtok filtrátu s rostoucím hydraulickým odporem klesal.

Ukončení filtrace

Po naplnění komor koláčem byl průtok filtrátu velmi malý. Čerpadlo i kompresor, se zastavil, vypnulo se míchadlo a uzavřel se kohout výtoku suspenze z nádrže. Při otevřeném kohoutu přívodu kalu do kalolisu a při otevřeném kohoutu pro výtok filtrátu, se zařízení odtlakovalo, tj. postupným uvolňováním uzavíracího šroubu, případně ještě vytekl zbylý filtrát ze středů filtračních koláčů.

Vyprázdnění kalolisu

Filtrační desky se odsouvaly postupně pouze na takovou vzdálenost, aby mohl vytéct zbylý filtrát a filtrační koláče přitom nevypadly z komor. Víko na záchytné vaně se odstranilo, tak aby do vany nenatekly případné úkapy filtrátu. Filtrační koláč se z komor odstranil pomocí umělé špachtle (nesmí dojít k poškození plachetek) do záchytné již vytárované vany. Bylo provedeno důkladné promytí filtračních desek (pomocí hadice napojené na vodovodní potrubí); je to součástí cyklu filtrace, musí být důkladné a zároveň šetrné k filtračním plachetkám. Nebyla-li prováděna bezprostředně další filtrace, ponechaly se plachetky na deskách volně vyschnout a až pak se kalolis uzavřel.

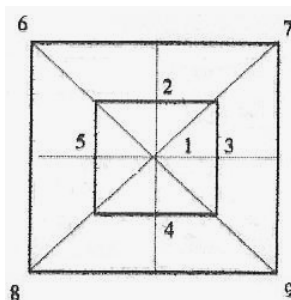
Stanovení hustoty koláče [24]

Po zvážení koláče se provedlo jeho vzorkování k získání vzorku koláče o průměrné vlhkosti (viz *Obrázek 47: Schéma odběru vzorků z filtračního koláče*). Celkem se do předem vytárované kádinky (1000 ml) odebralo lžící devět vzorků a ty se následně zvážily m_{pk} . Pak se vzorky zředily vodou (o změřené teplotě) natolik, aby je bylo možno po důkladném rozmíchání kvantitativně vpravit do vytárované Erlenmayerovy baňky (1000 ml) a doplnit vodou po rysku. Tato baňka s rozmíchaným vzorkem se zvážila m_{pc} . V chemicko-inženýrských tabulkách se našla hustota vody ρ_v při její změřené teplotě a dle rovnice (5) se

vypočítal objem V_{pl} potřebný na doplnění Erlenmayerovy baňky se vzorky koláče. Hustota koláče ρ_k se vypočítala dle rovnice (7).



Obrázek 46: Filtrační koláč.



Obrázek 47: Schéma průběhu filtrace.

3.2.3 Zpracování naměřených dat

Zaokrouhlování

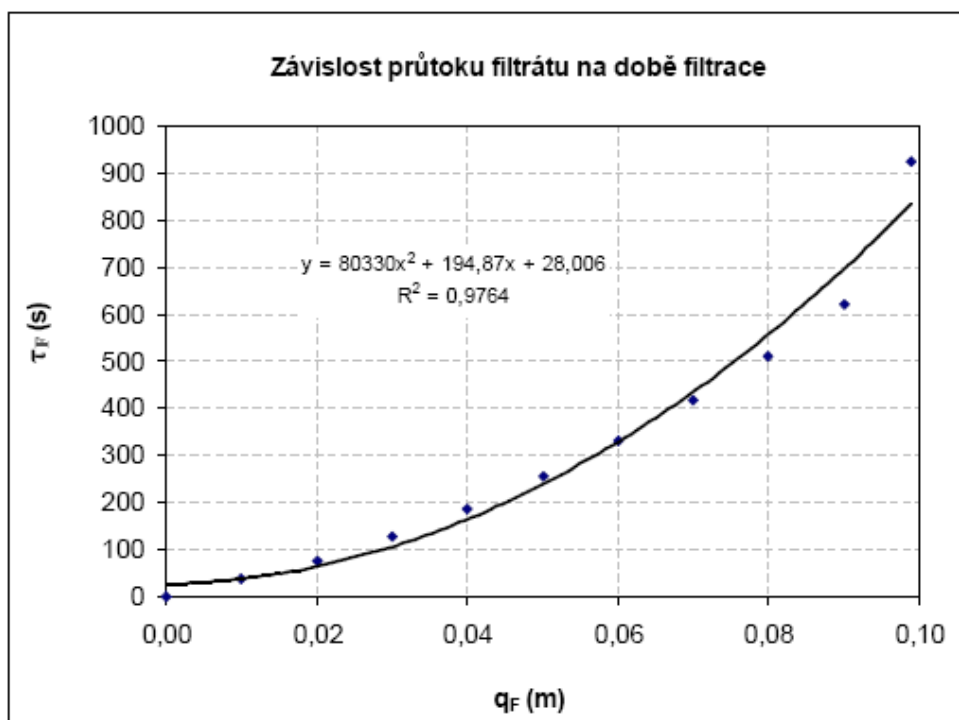
V rámci experimentu – filtrace se ke zjištění hmotnosti používaly dva typy elektrických vah. Odebrané vzorky (suspenze a filtračního koláče) se vážily na vahách s přesností 0,01 g a s maximální váživostí do 2,2 kg. Rovněž váhy určené pro změření hmotnosti koláče vážily s přesností 0,01 g. Proto se měřené hodnoty hmotnosti vždy odečítaly bez zaokrouhlování na celá čísla.

Výsledky se zpracovávaly pomocí programu MS Excel a zde zaokrouhlily na tři desetinná místa, avšak program MS Excel stále počítal s původními nezaokrouhlenými hodnotami, jež se do tabulky zanesly. Takto vypočítané výsledky se dále vyhodnotily a uvedly do protokolu, proto se může případné přepočítání hodnot z protokolu na kalkulačce mírně lišit od vypočítaných hodnot pomocí MS Excel. Výsledné výpočty jsou uvedeny v *tabulce 11 -13*, kde opakovaná měření jsou vyznačena barevně.

Výpočet chyby měření byl proveden analogicky se sušárnou a vypočítané chyby z opakovaných měření jsou uvedeny v *tabulce 14*.

Výpočet konstant filtrační rovnice [33]

Z naměřených hodnot doby trvání filtrace τ_F a objemu filtrátu V_F se dle rovnice (9) vypočítala filtrační plocha kalolisu S_F , dle rovnice (27) se zjistil průtok filtrátu q_F touto filtrační plochou. Vynesením do grafu hodnot závisle proměnných τ_F na nezávisle proměnných q_F a regresní analýzou se vypočítaly konstanty a_0 , a_1 , a_2 dle rovnic (30), (31) a (32) (viz *Graf 4: Závislost průtoku filtrátu na době filtrace*).



Graf 4: Závislost průtoku filtrátu na době filtrace.

Tabulka 11: Souhrnná tabulka naměřených a vypočtených hodnot.

Č. měření	m_c [kg]	V_s [l]	n [ks]	N [ks]	S_F [m ²]	m_s^0 [kg]	m_{ps} [kg]	ρ_v [kg/m ³]	η [Pa.s]	ρ_s^0 [kg/m ³]	V_s [l]	V_F [l]	m_F [kg]	x_{lk} [-]	x_s^0 [-]	x_k [-]
1	5	50	2	3	0,36	53,397	0,33738	999,69	1,306E-03	1067,936	19	27	26,992	0,227	0,117	0,773
2	5	90	2	3	0,36	128,161	0,44987	999,69	1,306E-03	1424,009	40	45	44,986	0,266	0,546	0,734
3	5	100	3	4	0,54	102,755	0,32462	999,69	1,306E-03	1027,545	2	96	95,970	0,290	0,050	0,710
4	5	100	4	5	0,72	103,134	0,32582	999,69	1,306E-03	1031,344	2	89	88,972	0,507	0,056	0,493
5	5	100	5	6	0,90	102,910	0,32511	999,69	1,306E-03	1029,096	1,5	86	85,973	0,235	0,052	0,765
6	2	100	4	5	0,72	101,653	0,32114	999,69	1,306E-03	1016,530	1	91	90,972	0,207	0,030	0,793
7	2	100	5	6	0,90	101,896	0,32201	999,37	1,20E-03	1018,957	1	90	89,943	0,173	0,035	0,827
8	2	100	5	6	0,90	101,991	0,32240	999,09	1,14E-03	1019,906	1	91	90,917	0,200	0,037	0,800
9	3	100	5	6	0,90	102,326	0,32346	999,09	1,14E-03	1023,259	1	90	89,918	0,175	0,043	0,825
10	3	100	4	5	0,72	102,041	0,32247	999,37	1,20E-03	1020,413	2	89	88,944	0,160	0,038	0,840
11	3	90	5	6	0,90	92,224	0,32383	999,37	1,20E-03	1024,717	2	82	81,948	0,159	0,045	0,841
12	3	90	5	6	0,90	92,153	0,32358	999,37	1,20E-03	1023,925	2	78	77,951	0,147	0,044	0,853
13	3	100	5	6	0,90	102,035	0,32245	999,37	1,20E-03	1020,350	4	89	88,944	0,140	0,038	0,860
14	3	100	5	6	0,90	101,836	0,32182	999,37	1,20E-03	1018,356	2	89	88,944	0,145	0,034	0,855
15	3	100	5	6	0,90	102,054	0,32251	999,37	1,20E-03	1020,540	1	89	88,944	0,133	0,038	0,867
16	3	100	5	6	0,90	101,937	0,32214	999,37	1,20E-03	1019,369	1	88	87,945	0,126	0,036	0,874
17	3	100	5	6	0,90	101,886	0,32198	999,37	1,20E-03	1018,862	1	89	88,944	0,143	0,035	0,857
18	3	100	5	6	0,90	101,886	0,32198	999,37	1,20E-03	1018,862	1	89	88,944	0,143	0,035	0,857
19	3	100	5	6	0,90	102,095	0,32264	999,37	1,20E-03	1020,951	1	89	88,944	0,130	0,039	0,87
20	3	100	5	6	0,90	102,095	0,32264	999,37	1,20E-03	1020,951	1	89	88,944	0,130	0,039	0,87
21	3	100	5	6	0,90	102,095	0,32264	999,37	1,20E-03	1020,951	1	89	88,944	0,130	0,039	0,87

Tabulka 12: Souhrnná tabulka naměřených a vypočtených hodnot – pokračování 1.

Č. měření	m_k [kg]	V_k [m ³]	ρ_k [kg/m ³]	m_{pk} [kg]	m_{pc} [kg]	V_{pk} [m ³]	L [m]	ϵ_k [-]	α [m ⁻²]	K_F [m ² .s ⁻¹]	q_M [m]	R [kg.m ⁻² .s ⁻¹]
1	4,86	0,00281	1729,188	0,13211	1,05546	7,640E-05	3,904E-03	0,392	7,156E+14	4,112E-06	-3,980E-06	-3,872E+08
2	10,01	0,00600	1667,206	0,11337	1,04506	6,800E-05	8,339E-03	0,646	1,662E+16	7,316E-06	3,257E-02	9,430E+10
3	3,98	0,00244	1631,122	0,15985	1,06161	9,800E-05	1,506E-03	0,474	1,097E+16	1,677E-05	1,146E-02	4,173E+09
4	6,67	0,00488	1367,717	0,12159	1,03240	8,890E-05	1,693E-03	0,693	3,060E+16	7,325E-06	-5,972E-03	-1,308E+10
5	6,54	0,00381	1716,125	0,13729	1,05700	8,000E-05	8,469E-04	0,403	2,735E+16	7,015E-06	4,048E-03	6,407E+09
6	3,76	0,00213	1761,214	0,13468	1,05792	7,647E-05	7,413E-04	0,366	2,368E+16	8,738E-06	-7,729E-03	-5,608E+09
7	3,67	0,00201	1822,050	0,15287	1,06838	8,390E-05	4,476E-04	0,315	2,930E+16	6,698E-06	-6,945E-03	-5,465E+09
8	3,48	0,00196	1773,123	0,13458	1,05783	7,590E-05	4,361E-04	0,355	2,483E+16	9,571E-06	8,548E-03	5,210E+09
9	4,18	0,00230	1818,237	0,26819	1,11990	1,475E-04	5,109E-04	0,318	1,589E+16	7,425E-06	1,676E-03	7,740E+08
10	4,30	0,00233	1845,912	0,31159	1,14225	1,688E-04	8,088E-04	0,295	1,025E+16	9,571E-06	8,548E-03	5,210E+09
11	3,85	0,00208	1847,768	0,31874	1,14573	1,725E-04	4,630E-04	0,293	1,451E+16	5,909E-06	-3,015E-03	-1,334E+09
12	4,02	0,00215	1870,648	0,34925	1,16200	1,867E-04	4,776E-04	0,274	9,997E+15	7,447E-06	9,093E-03	3,005E+09
13	3,95	0,00210	1882,302	0,25073	1,11698	1,332E-04	4,663E-04	0,265	1,391E+16	7,743E-06	4,185E-03	1,647E+09
14	3,56	0,00190	1873,390	0,28411	1,13192	1,517E-04	4,223E-04	0,272	1,098E+16	8,655E-06	6,918E-03	1,946E+09
15	4,12	0,00217	1896,541	0,29339	1,13816	1,547E-04	4,828E-04	0,253	1,115E+16	8,252E-06	1,063E-02	3,471E+09
16	4,02	0,00210	1909,963	0,28700	1,13620	1,503E-04	4,677E-04	0,242	1,347E+16	6,985E-06	3,822E-03	1,477E+09
17	4,02	0,00214	1877,458	0,28700	1,13360	1,529E-04	4,758E-04	0,269	1,372E+16	6,856E-06	1,776E-03	7,037E+08
18	4,02	0,00214	1877,458	0,28700	1,13360	1,529E-04	4,758E-04	0,269	1,286E+16	7,317E-06	7,073E-03	2,625E+09
19	4,02	0,00211	1903,625	0,28700	1,13570	1,508E-04	4,693E-04	0,25	1,507E+16	6,244E-06	1,131E-03	4,851E+08
20	4,02	0,00211	1902,362	0,28700	1,13560	1,509E-04	4,696E-04	0,25	1,511E+16	6,224E-06	1,213E-03	5,223E+08
21	4,02	0,00211	1902,362	0,28700	1,13560	1,509E-04	4,696E-04	0,248	1,372E+16	6,856E-06	1,776E-03	6,945E+08

Tabulka 13: Souhrnná tabulka naměřených a vypočtených hodnot – pokračování 2.

Č. měření	a_0 [s]	a_1 [s.m ⁻¹]	a_2 [s.m ⁻²]
1	5,3	-968	121600
2	21,57	4451,4	68343
3	2,2669	683,44	29810
4	27,113	-815,2	68257
5	13,102	577,05	71273
6	32,548	-884,49	57222
7	26,93	-1036,9	74650
8	14,178	893,13	52241
9	22,923	225,73	67343
10	20,909	890,77	53817
11	28,57	-510,28	84613
12	12,469	1221	67140
13	21,324	540,5	64572
14	18,541	799,3	57769
15	15,428	1287,7	60594
16	21,623	547,18	71581
17	23,283	259,09	72930
18	19,802	966,6	68330
19	27,949	181,1	80074
20	28,006	194,87	80330
21	23,283	259,09	72930

Tabulka 14: Vypočítané chyby z opakovaných měření.

Měřená hodnota x_i	Aritmetický průměr \bar{x}	Výběrový rozptyl s_x^2	Výběrová směrodatná odchylka s_x	Směrodatná odchylka aritmetického průměru $s_{\bar{x}}$	Konečný výsledek $\bar{x} \pm s_{\bar{x}}$
m_s^0 [kg]	102,025	1,98E-02	1,41E-01	4,45E-02	102,025±4,45E-02
m_{ps} [kg]	0,32237	2,16E-07	4,65E-04	1,47E-04	0,32237±1,47E-04
ρ_s^0 [kg/m ³]	1020,069	1,95	1,40	4,42E-01	1020,069±4,42E-01
m_F [kg]	88,941	2,16E-01	4,65E-01	1,47E-01	88,941±1,47E-01
x_{lk} [-]	0,142	1,76E-04	1,33E-02	4,20E-03	0,142±4,20E-03
x_s^0 [-]	00,03725	6,61E-06	2,57E-03	8,13E-04	00,03725±8,13E-04
x_k [-]	0,858	1,76E-04	1,33E-02	4,20E-03	0,858±4,20E-03
m_k [kg]	3,99	2,72E-02	1,65E-01	5,22E-02	3,99±5,22E-02
V_k [m ³]	0,00212	9,47E-09	9,73E-05	3,08E-05	0,00212±3,08E-05
ρ_k [kg/m ³]	1879,872	7,35E+02	2,71E+01	8,57	1879,872±8,57
m_{pk} [kg]	0,281	1,63E-04	1,28E-02	4,04E-03	0,281±4,04E-03
m_{pc} [kg]	1,131	6,91E-05	8,31E-03	2,63E-03	1,131±2,63E-03
V_{pk} [m ³]	1,493E-04	3,69E-11	6,07E-06	1,92E-06	1,493E-04±1,92E-06
L [m]	4,714E-04	4,66E-10	2,16E-05	6,82E-06	4,714E-04±6,82E-06
ε_k [-]	0,263	4,92E-04	2,22E-02	7,01E-03	0,263±7,01E-03
α [m ⁻²]	1,359E+16	2,58E+30	1,61E+15	5,08+14	1,359E+16±5,08+14
K_F [m ² .s ⁻¹]	7,256E-06	6,33E-13	7,96E-07	2,52E-07	7,256E-06±2,52E-07
q_M [m]	4,020E-03	1,04E-05	3,22E-03	1,02E-03	4,020E-03±1,02E-03
R [kg.m ⁻² .s ⁻¹]	1,435E+09	1,01E+18	1,01E+09	3,18E+08	1,435E+09±3,18E+08

4 ZÁVĚR

Cílem této diplomové práce bylo optimalizovat pracovní podmínky na modelových stanicích procesu sušení a filtrace, dodaných firmou TESUR a ANTARES. Tyto modelové stanice budou sloužit ke studiu chemických procesů v rámci laboratoří Procesního inženýrství.

Všechny cíle uvedené v úvodu této diplomové práce byly v rámci experimentálního měření splněny.

Jedním z cílů experimentálního měření na periodické sušárně, bylo stanovit délku I. období sušení. Z naměřených a vypočtených dat vyplývá, že délka tohoto období závisí na hmotnosti vody sloužící k navlhčení suchého písku, dále závisí na teplotě ohřevu vzduchu a hmotnosti průtoku vzduchu sušárnou.

Po optimalizaci pracovních podmínek a provedení opakovaných měření vybraného experimentu, byly spočítány chyby vznikající při měření, kdy největší chybou (od níž se odvíjely i ostatní chyby) byla nepřesnost v navážení potřebné hmotnosti vody a v jejím vpravení na suchý písek. Tyto rozdíly byly způsobeny jednak nepřesným odměřením 60 ml vody a dále při použití rozprašovače, kde vždy určitá část objemu vody zůstala v nasávacím hrdle rozprašovače a během rozprašování docházelo k rozstříku kapaliny, kdy část kapiček dopadla do okolí lisky s pískem. K dalším nepřesnostem měření došlo při vážení lisky s již vlhkým materiálem nad sušící pecí (na vlastním tělese vah) a uvnitř sušárny (na závěsném systému vah), kde již proudil ohřátý vzduch a závěsný systém s lískou se rozhybal. Aby došlo k co nejmenší chybě měření doporučuji navlhčit suchý písek po vytopení sušárny na nastavenou regulovanou teplotu a okamžitě jej do sušící pece vložit a odečíst první hodnotu hmotnosti na ukazateli vah, což bude po odečtení hmotnosti lisky se suchým pískem hodnota hmotnosti vody, jež byla použita k navlhčení tohoto písku. Dále doporučuji provádět vlhčení rozprašovačem rychle a z takové výšky nad lískou, aby nedocházelo k úkapům vody mimo lísku s pískem.

Pro výpočet spotřeby sušícího vzduchu bylo potřeba zjistit průtok vzduchu sušárnou. K dispozici byl elektrický turbínový plynoměr, měřící celkový objem vzduchu dopravovaný ventilátorem do sušárny. Okamžitý průtok vzduchu byl vypočítán ze zjištěných hodnot objemu vzduchu prošlého turbínovým plynoměrem za časovou jednotku. Součástí dodávky laboratorního sušícího zařízení firmou TESUR byl i propojovací kabel SP003 pro nastavení snímačů přes USB port včetně CD s obslužným programem ke změně měřících funkcí na snímačích i na turbínovém plynoměru. Proto doporučuji naprogramovat pomocí tohoto CD

plynoměr tak, aby v každém okamžiku měření ukazoval aktuální průtok vzduchu.

Zvýšení rychlosti sušení by bylo možné pouze snížením objemu vody potřebného k navlhčení suchého písku, nebo ještě zvýšením rychlosti průtoku vzduchu frekvenčním měničem na ovládací skříni. Avšak v případě příliš vysoké rychlosti proudění vzduchu může v posledním období sušení docházet k unášení částic písku proudícím vzduchem, což je nežádoucí.

Jedním z úkolů experimentální měření filtrace bylo stanovení konstant filtrační rovnice. Z naměřených a vypočítaných dat vyplývá, že hodnoty konstant závisí na koncentraci suspenze a počtu použitých filtračních desek, kdy s rostoucí koncentrací suspenze rostou i filtrační konstanty a se snižováním počtu filtračních desek roste odpor koláče.

Byly provedeny opakované experimenty k určení chyby vznikající při měření, ze kterých je největší nepřesnost při odebírání vzorku koláče pro stanovení jeho hustoty a koncentrace. Doporučuji stanovit určitou hmotnost vzorku, která se bude v rámci laboratorních prací odebírat ze vzniklého filtračního koláče, a s touto hmotností dále pokračovat při stanovování koncentrace a hustoty filtračního koláče dle návodu.

Dále doporučuji dokoupení elektrických vah, určených k vážení vzorků a filtračních koláčů, v případě že by jiné váhy v laboratoři nebyly během filtrace k dispozici a docházelo by tím k časovým nežádoucím prodlevám. Tyto nové váhy by měly být s minimální váživostí 8 kg na 3 kg suché křídly používané k přípravě suspenze.

Během filtrace na kalolisu se suspenze v nádrži míchá elektrickým míchadlem, aby nedocházelo k jejímu usazování. Avšak při poklesu objemu suspenze ze 100 l na objem 40 l (při sedmém odběru filtrátu), míchadlo muselo být vypnuto, protože již nezasahovalo svou délkou do zbývající suspenze. Další míchání probíhalo ručně pomocí špachtle, a proto by bylo vhodné namontování nového míchadla s delší hřídelí (tzn. asi o 20 až 30 cm delší dle výšky nádrže).

Zároveň doporučuji po ukončení filtrace a odměření potřebných vzorků pro výpočty, vpravit vzniklý filtrační koláč do nádoby s vodou, aby při dalším experimentu bylo rozmíchání suspenze jednodušší a rychlejší. Aby nedocházelo k příliš velkým ztrátám pevné látky během filtrace, je důležité důkladně promývat filtrační desky a proplachovat potrubí. Za tímto účelem doporučuji provést proplach kalolisu čistou vodou pomocí tlakové zkoušky (ta se koná vždy před samotnou filtrací). A takto získanou vypláchnutou suspenzi vpravit do nádrže na suspenzi. Dále doporučuji neotevírat víko nádrže během míchání suspenze elektrickým míchadlem, kdy může dojít k rozstříku suspenze do okolí.

5 SEZNAM CITOVANÉ LITERATURY

- [1] J. DOBIÁŠ. *Sylabus textů k přednáškám z předmětu Technologie zpracování ovoce a zeleniny I*. Ústav konzervace potravin a technologie masa, VŠCHT Praha, 2004. 152 s.
- [2] D. ŠNITA. *Chemické inženýrství I*. 1. vydání. VŠCHT Praha, 2008. 318 s. ISBN: 80-7080-589-7.
- [3] E. KOSSACZKÝ, J. SUROVÝ. *Chemické inženýrstvo* 2. 4. vydání. Alfa, vydavatel'stvo technickej a ekonomickej literatúry Bratislava, 1983. 398 s. I-41385-18904/83.
- [4] V. MÍKA. *Základy chemického inženýrství*. 2. vydání. SNTL ALFA, Bratislava, 1981. 872 s. I-140077-3699/903.
- [5] *Studium vlivu sušících metod na fyzikálně-chemické a mikrobiologické vlastnosti různých druhů papíru*. Národní knihovna ČR, Praha. Státní ústřední archiv v Praze. Prosinec 2002, leden 2003. [online]. [cit. 2009-10-17].
Dostupné z <http://www.npk.cz/povodne/suseni.htm>.
- [6] W.L. McCABE et al. *Unit operations of chemical engineering*. 7 edition. The McGraw Hill Companies, 2005. Pages 1140. ISBN 978-0-07-124810-8.
- [7] J. NEUVIRT. *Hromadné sušení zmrazených knih a dokumentů*. [online]. [cit. 2010-01-16].
Dostupné z <http://old.stk.cz/caslin03/articles/neuvirt.pdf>
- [8] *Separční technologie*. [online]. [cit. 2009-07-18]. Dostupné z
[http://www.vupp.cz/czvupp/departments/odd350/06brefP2\(9-64\).pdf](http://www.vupp.cz/czvupp/departments/odd350/06brefP2(9-64).pdf)
- [9] LYLE F. ALBRIGHT. *Albright's Chemical Engineering Handbook*. CRC Press, 2009. 1859 s. ISBN 978-0-8247-55362-7.
- [10] J. HANIKA. *Speciální separční procesy*. 1. vydání. VŠCHT Praha, 1995, 77 s. ISBN-80-7080-242-1.
- [11] *Sušení ovoce mikrovlnami*. [online]. [cit. 2009-12-17]. Dostupné z
<http://www.agronavigator.cz/at/vis.aspx?id=92019>.
- [12] P. SAMEK. *Návrh zařízení pro sušení hnědého uhlí s využitím u moderních uhelných bloků*. Praha, 2001. 86 s. Diplomová práce na FSI ČVUT. Ústav mechaniky tekutin a energetiky – Odbor tepelných a jaderných energetických zařízení. Vedoucí práce Ing. Tomáš Dlouhý Csc.
- [13] A.C. METAXAS, R.J. MEREDITH. *Industrial Microwave Heating*. Peter Peregrinus Ltd, Stevenage, 1993.
- [14] *Sušení, zušlechťování textilií*. [online]. [cit. 2009-11-17].
Dostupné z <http://www.sklo-latexu.cz/zus/index.php?page=33>.
- [15] ITARU SOTOME et al. *Blanching of potato with superheated steam and hot water*

- spray. LWT –Food Science and Technology. Volume 42, issue 2. Accepted 2 February 2009. Pages 1035-1040.
- [16] *Mikrovlnný ohřev – sušení*. VŠCHT Praha. [online]. [cit. 2010-01-16]. Dostupné z <http://www.vscht.cz/sch/www321/profil.html>.
- [17] I. KOVAŘÍK, M. HÁJEK a kol. *Mikrovlnné metody při ochraně památek*. Odborný seminář. STOP, Národní muzeum Praha, 2003. 33 s.
- [18] G. ROUSSY, J.A. PEARCE. *Foundations and Industrial Applications of Microwave and Radio Frequency Fields*, John Wiley&Sons, Chichester, 1995.
- [19] O. HOLEČEK. *Chemicko-inženýrské tabulky*. 2. vydání. VŠCHT Praha, 2001. 125 s. ISBN 80-7080-444-0.
- [20] J. SCHWARZER. *Vlhký vzduch a jeho úpravy*. [online]. [cit. 2009-11-17]. Dostupné z <http://www.fsid.cvut.cz/~schwarze>.
- [21] DILIP K. DAS, RAJARAM K. PRABHUDESAI. *Chemical Engineering: Licence Review*. Publisher by Kaplan AEC Education USA, 2004, IL 60606-7481(312)836-4400, 517 s.
- [22] *Chemicko-inženýrské tabulky*. [online]. [cit. 2009-11-17]. Dostupné z http://www.vscht.cz/uchi/e_tabulky/index.html.
- [23] V. MÍKA a kol. *Příklady a úlohy z chemického inženýrství – II. díl*. 1. vydání. VŠCHT Praha, 1997. 825 s. ISBN 80-7080-305-3.
- [24] M. LUDVÍK a kol. *Laboratorní cvičení z chemického inženýrství*. VŠCHT Praha, 1992. 160 s. ISBN: 80-7080-150-6.
- [25] K. GÓRNICKI, A. KALETA. *Drying curve modelling of blanched carrot cubes under natural convection condition*. Journal of Food Engineering. Volume 82, issue 2, September 2007, pages 160-170.
- [26] L. NEUŽIL a kol. *Chemické inženýrství IA*. VŠCHT Praha, 1992. 293 s. ISBN: 80-7080-164-6.
- [27] *Přednáška filtrace a filtrační materiály*. [online]. [cit. 2010-02-23]. Dostupné z <http://www.ft.tul.cz/depart/knt/nove/dokumenty/studmaterialy/filtr.pdf>.
- [28] M. BUGEL. *Pomocné úpravnické procesy*. 1. vydání. Rektorát Vysoké školy technickej v Košiciach, 1984. 198 s. ISBN 84-614-84.
- [29] J. RICHTER a kol. *Chemické inženýrství I*. 1. vydání. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická, 2004. 228 s. ISBN 80-214-2568-7.
- [30] J. SUROVÝ, E. KOSSACZKÝ. *Chemické inženieerstvo I*. Slovenské vydavateľstvo

- technickej literatury Bratislava, 1963.
- [31] J. DOHNAL: *Základní pochody chemické a potravinářské výroby. Pochody hydraulické.* Skriptum ČVUT. SNTL, Praha 1966.
- [32] ENVITES, *Technika pro vodní a kalové hospodářství.* [online]. [cit. 2010-02-23].
Dostupné z <http://www.envites.cz>.
- [33] M. Ludvík: *Laboratorní cvičení z chemického inženýrství.* Vydavatelství VŠCHT Praha 2005. ISBN 80-7080-589-7.
- [34] Antonello A. Barresi, et al: *Monitoring of the primary drying of a lyophilization process in vials.* *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, volume 48, issue, January 09, pages 408-423.
- [35] M. J. Steinbeck. *Convective drying of porous material containing a partially miscible mixture.* *Chemical Engineering and Processing*, volume 38, issue 4-6, September 1999, pages 487-502.
- [36] S. J. Kowalski. *Kontrol of mechanical processes in drying. Theory and experiment.* *Chemical Engineering Science*, volume 65, issue 2, January 2010, pages 890-899.
- [37] J. D. Sherwood, G. H. Meeten. *The filtration properties of compressible mud filtercakes.* *Journal of Petroleum Science and Engineering*, volume 18, issue 1-2, July 1997, pages 73-81.

6 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

Symbol	Význam
aj.	a jiný
apod.	a podobně
atd.	a tak dále
CaCl_2	chlorid vápenatý
MgCl_2	chlorid hořečnatý
např.	například
PA	polyamid
PES	polyester
PP	polypropylen
tj.	to je
tzn.	to znamená
tzv.	tak zvaný

7 SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ

Symbol	Jednotka SI	Význam
g		plyn
l		kapalina
T	K	termodynamická teplota
l_1	J.kg^{-1}	relativní měrná entalpie při teplotě před kaloriferem
l_2	J.kg^{-1}	relativní měrná entalpie při teplotě za kaloriferem
k_y	$\text{W.m.}^{-2} \text{K}^{-1}$	koeficient přestupu hmoty
α	$\text{W.m.}^{-2} \text{K}^{-1}$	koeficient přestupu tepla
M	kg mol^{-1}	molární hmotnost
m_A	kg	hmotnost vody
m_C	kg	hmotnost materiálu
m_B	kg	hmotnost suchého vzduchu
p	Pa	tlak
p_A	Pa	parciální tlak vody ve vzduchu při teplotě t_2
p_A^0	Pa	tenze vodní páry při teplotě t
p_b	Pa	barometrický tlak
p_{AW}	Pa	parciální tlak při teplotě t_w
p_v	Pa	parciální tlak vodní páry
Δp	Pa	konstantní tlakový rozdíl
Q_T	J	spotřeba tepla elektrickým topením za I. období
Q_i	J	spotřeba tepla k opaření vody za I. období
Q_{SK}	J	skutečná spotřeba tepla za I. období
X_A	1	relativní hmotnostní zlomek vody
X_{AC}	1	kritická vlhkost
Y_A	1	relativní hmotnostní zlomek vody ve vzduchu při t_2
Y_{AW}	1	relativní hmotnostní zlomek vody ve vzduchu při t_w
ρ_{vlvz}	kg m^{-3}	hustota vlhkého vzduchu
τ	s	čas
Φ_I	$\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$	rychlost sušení v I. období
t_D	$^{\circ}\text{C}$	teplota rosného bodu
t_w	$^{\circ}\text{C}$	teplota mokrého teploměru

t_1	$^{\circ}\text{C}$	teplota před kaloriferem (teplota laboratoře)
t_2	$^{\circ}\text{C}$	teplota za kaloriferem (teplota suchého vzduchu u)
φ_A	1	relativní vlhkost
$\Delta h_{IV,A}$	J.kg^{-1}	výparná entalpie vody
A	m^2	plocha lísky
S_F	m^2	filtrační plocha
C_{pg}	$\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$	měrná tepelná kapacita vlhkého vzduchu
C_{pA}	$\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$	měrná tepelná kapacita vody při t_2
C_{pB}	$\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$	měrná tepelná kapacita vzduchu při t_2
m_{BI}	kg	spotřeba sušícího vzduchu za I. období
m_{AI}	kg	hmotnost odpařené vody za I. období
V'	$\text{m}^3.\text{h}^{-1}$	objemový průtok vzduchu
v	$\text{m}^3.\text{kg}^{-1}$	měrný objem sušícího vzduchu
l	1	měrná spotřeba sušícího vzduchu
η_1	1	teoretická tepelná účinnost sušárny
η_2	1	praktická tepelná účinnost sušárny
m_s^0	kg	hmotnost suspenze na počátku
m_F	kg	hmotnost filtrátu
m_K	kg	hmotnost koláče
m_Z	kg	celková hmotnostní ztráta
m_{sZ}	kg	hmotnostní ztráty pevné látky
m_S	kg	hmotnost zbylé suspenze
m_{ps}	kg	hmotnost odebrané suspenze
m_{p1}	kg	hmotnost vody
q_F	m	průtok filtrátu
ρ_v	kg/m^3	hustota vody
η	Pa.s	dynamická viskozita vody
ρ_s^0	kg/m^3	hustota suspenze
V_s	l	objem zbylé suspenze
V_F	l	objem filtrátu
ρ_s	kg/m^3	hustota křídý
x_s^0	1	hmotnostní zlomek pevné látky v suspenzi
x_k	1	hmotnostní zlomek pevné látky v koláči
x_{lk}	1	vlhkost koláče
n	ks	počet filtračních koláčů
N	ks	počet filtračních desek
V_s	l	objem suspenze
m_k	kg	hmotnost koláče
V_k	m^3	objem koláče
ρ_k	kg/m^3	hustota koláče
m_{pk}	kg	hmotnost souborného vzorku koláče
m_{pc}	kg	hmotnost koláče s doplněnou vodou
V_{pk}	m^3	objem souborného vzorku koláče
L	m	tloušťka koláče
ε_k	1	porozita koláče
α	m^{-2}	měrný odpor koláče
R	$\text{kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$	odpor filtrační přepážky
K_F	$\text{m}^2.\text{s}^{-1}$	filtrační konstanta
q_M	m	filtrační konstanta
a_0	s	hodnota z grafu závislosti τ_F na q_F
a_1	s.m^{-1}	hodnota z grafu závislosti τ_F na q_F
a_2	s.m^{-2}	hodnota z grafu závislosti τ_F na q_F
β	m^{-2}	konstanta
a, b	m	výška a šířka filtrační desky

8 SEZNAM OBRÁZKŮ

- Obrázek 1: Uložení vlhkého materiálu na lísce.
Obrázek 2: Uložení vlhkého materiálu na síť.
Obrázek 3: Uložení vlhkého materiálu v rotujícím válci.
Obrázek 4: Uložení vlhkého materiálu ve fluidní sušárně.
Obrázek 5: Tok materiálu a plynu v pneumatických sušárnách.
Obrázek 6: Skříňová sušárna.
Obrázek 7: Vsádková vakuová sušárna.
Obrázek 8: Lopatková sušárna.
Obrázek 9: Lyofilizační tunelová sušárna.
Obrázek 10: Typy fluidačních sušáren.
Obrázek 11: Rozprašovací sušárna.
Obrázek 12: Turbínová sušárna.
Obrázek 13: Rotační bubnová sušárna a tři ukázky vestavby bubnu.
Obrázek 14: Kontaktní bubnová sušárna.
Obrázek 15: Bubnová sušárna skořápek.
Obrázek 16: Fázový diagram směsi vzduch – voda.
Obrázek 17: Teplota mokrého teploměru.
Obrázek 18: Entalpický diagram vlhkého vzduchu.
Obrázek 19: Richard Mollier.
Obrázek 20: Závislost φ na X_A .
Obrázek 21: Kvantitativní průběh závislosti obsahu vlhkosti v materiálu na čase.
Obrázek 22: Průběh rychlosti sušení.
Obrázek 23: Princip činnosti filtru.
Obrázek 24: Uzavřený pískový filtr.
Obrázek 25: Vakuový filtrační nuč.
Obrázek 26: Listový filtr.
Obrázek 27: Svíčkový filtr.
Obrázek 28: Filtrační odstředivka.
Obrázek 29: Pásový vakuový filtr.
Obrázek 30: Bubnový vakuový filtr.
Obrázek 31: Ukázka drážkování komorové filtrační desky.
Obrázek 32: Bilanční schéma filtrace.
Obrázek 33: Schéma toku hustou sítí kanálků.
Obrázek 34: Rozdělení tlaků ve filtru.
Obrázek 35: Schéma laboratorní sušárny.
Obrázek 36: Schéma ovládací skříně s regulátorem.
Obrázek 37: Laboratorní sušárna.
Obrázek 38: Líska s materiálem.
Obrázek 39: Psychometr sušárny.
Obrázek 40: Turbínový plynoměr.
Obrázek 41: Rozprašovač.
Obrázek 42: Laboratorní psychometr.
Obrázek 43: Schéma laboratorního kalolisu – komorového.
Obrázek 44: Schéma filtrační nádrže pro suspenzi.
Obrázek 45: Náhled laboratorního komorového kalolisu.
Obrázek 46: Filtrační koláč.
Obrázek 47: Schéma odběru vzorků z filtračního koláče.

9 SEZNAM TABULEK

Tabulka 1:	Pohyb sušeného materiálu v sušárnách
Tabulka 2:	Nepřetržité sušení – tok vzduchu
Tabulka 3:	Druhy sušáren
Tabulka 4:	Rozdělení filtračních procesů
Tabulka 5:	Parametry filtrace
Tabulka 6:	Charakteristika filtračních kalolisů
Tabulka 7:	Souhrnná tabulka naměřených a vypočtených hodnot
Tabulka 8:	Souhrnná tabulka naměřených a vypočtených hodnot – pokračování 1
Tabulka 9:	Souhrnná tabulka naměřených a vypočtených hodnot – pokračování 2
Tabulka 10:	Vypočítané chyby z opakovaných měření
Tabulka 11:	Souhrnná tabulka naměřených a vypočtených hodnot
Tabulka 12:	Souhrnná tabulka naměřených a vypočtených hodnot – pokračování 1
Tabulka 13:	Souhrnná tabulka naměřených a vypočtených hodnot – pokračování 2
Tabulka 14:	Vypočítané chyby z opakovaných měření

10 SEZNAM GRAFŮ

Graf 1:	Závislost teploty regulace na čase.
Graf 2:	Závislost obsahu vlhkosti v materiálu na čase.
Graf 3:	Závislost rychlosti sušení na obsahu vlhkosti v materiálu.
Graf 4:	Závislost průtoku filtrátu na době filtrace.

11 PŘÍLOHY

Příloha I: Vypracovaný vzorový protokol – Sušení

Příloha III: Vypracovaný vzorový protokol - Filtrace

Příloha I: Vypracovaný vzorový protokol – Sušení

VŠB-TU Ostrava, Katedra Fyzikální chemie a teorie technologických pochodů		
Jméno: Julie Kadurová	<u>DIPLOMOVÁ PRÁCE</u>	Úloha číslo: 8
Datum měření: 18.2.2010		Školní rok: 2009/2010
	Název úlohy: Studium kinetiky procesu sušení	Skupina: HN1CHI02

Tabulka 1: Podmínky měření

$m_l =$	0,34677	kg	Hmotnost lísky		Začátek	Konec
$m_C =$	0,50001	kg	Hmotnost suchého materiálu	Spotřeba vzduchu [m ³]	3840,9	4134,1
$m_{A0} =$	0,05659	kg	Hmotnost vody na počátku	Spotřeba el. en. [kWh]	60,2	66,2
$Q_V =$	114	m ³ /h	Objemový průtok vzduchu			
A	0,052	m ²	Plocha lísky			

Tabulka 2: Podmínky laboratoře**Průměrné hodnoty (zjištěné na počátku a konci měření)**

Teplota laboratoře [° C]	22,3
Teplota rosného bodu [° C]	3,9
Teplota vlhkého teploměru [° C]	12,5
Tlak barometrický [Pa]	96735
Nastavená teplota regulace [° C]	85
Relativní vlhkost [%]	30,3
Obsah vody ve vzduchu [g/kg]	5,3
Absolutní vlhkost [g/m ³]	6,3
Měrný objem [m ³ /g]	0,2

Výpočty

Cíl 1: Bilance hmotnosti mokrého materiálu při procesu sušení.

Výpočet hmotnosti odpařené vody m_{ov} dle vztahu (16):

$$m_{ovi} = \frac{m_0 - m_i}{1000}$$

$$m_{ov1} = \frac{m_0 - m_1}{1000} = \frac{903,37 \text{ g} - 901,25 \text{ g}}{1000} = \underline{\underline{0,00212 \text{ kg}}}$$

 m_i – údaj na váze [g], tzn. hmotnost mokrého materiálu i s lískou**Výpočet úbytku vody Δm_A dle vztahu (17):**

$$\Delta m_{Ai} = \frac{m_{i-1} - m_i}{1000}$$

$$\Delta m_{A1} = \frac{m_0 - m_1}{1000} = \frac{903,37 \text{ g} - 901,25 \text{ g}}{1000} = \underline{\underline{0,00212 \text{ kg}}}$$

Výpočet obsahu vody v materiálu m_A dle vztahu (18):

$$m_{Ai} = m_{A0} - m_{ovi}$$

$$m_{A1} = m_{A0} - m_{ov1} = 0,05659\text{kg} - 0,00212\text{kg} = \underline{\underline{0,0545\text{kg}}}$$

m_{A0} – hmotnost vody na počátku [kg]

Cíl 2: Grafické znázornění křivky sušení, tj. závislosti $X_A = f(\tau)$. Vymezení I. období sušení a zjištění kritické vlhkosti X_{AC} .

Výpočet relativního hmotnostního zlomku vlhkosti (měrná vlhkost materiálu) X_A (9):

$$X_{Ai} = \frac{m_{Ai}}{m_C}$$

$$X_{A1} = \frac{m_{A1}}{m_C} = \frac{0,05659\text{kg}}{0,50001\text{kg}} = \underline{\underline{0,109[-]}}$$

Z naměřených dat byl sestrojen graf $X_A = f(\tau)$. (Viz Graf 1: Závislost obsahu vlhkosti v materiálu na čase).

Pomocí lineární regrese byla zjištěna **směrnice lineární části křivky odpovídající prvnímu období sušení**: $\frac{dX_A}{d\tau} = -2 \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-1}$

Z tabulky naměřených dat a sestrojeného *Grafu 1* byly odečteny tyto hodnoty:

$$\tau_1 = 3600 \text{ s} - \text{délka prvního období sušení}$$

$$X_{AC} = 0,027[-] - \text{kritická vlhkost}$$

Cíl 3: Sestrojení křivky rychlosti sušení (za celé období sušení), tj. závislosti $\phi_A = f(X_A)$ s vyznačením kritické vlhkosti.

Výpočet průměrné rychlosti sušení v I. období dle směrnice Grafu 1 dle vztahu (13):

$$\phi_{Ai} = -\frac{m_C}{A} \cdot \frac{dX_A}{d\tau} = -\frac{0,50001\text{kg}}{0,052\text{m}^2} \cdot (-2 \cdot 10^{-5}) \text{ s}^{-1} = \underline{\underline{1,923 \cdot 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}}}$$

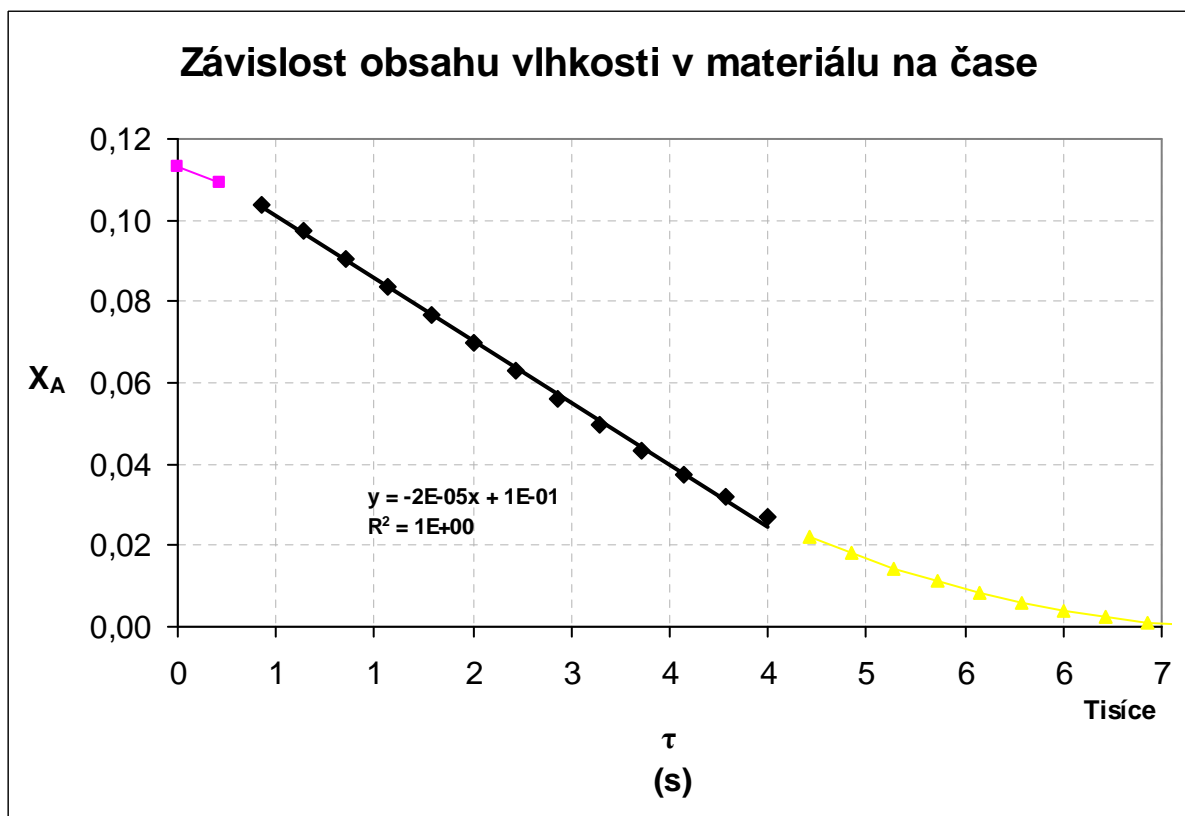
Výpočet rychlosti sušení za sledované období ϕ_A dle vztahu (12):

$$\phi_{Ai} = \frac{\Delta m_{Ai}}{A \cdot \Delta \tau} = \frac{\Delta m_{Ai}}{A \cdot (\tau_{i+1} - \tau_i)}$$

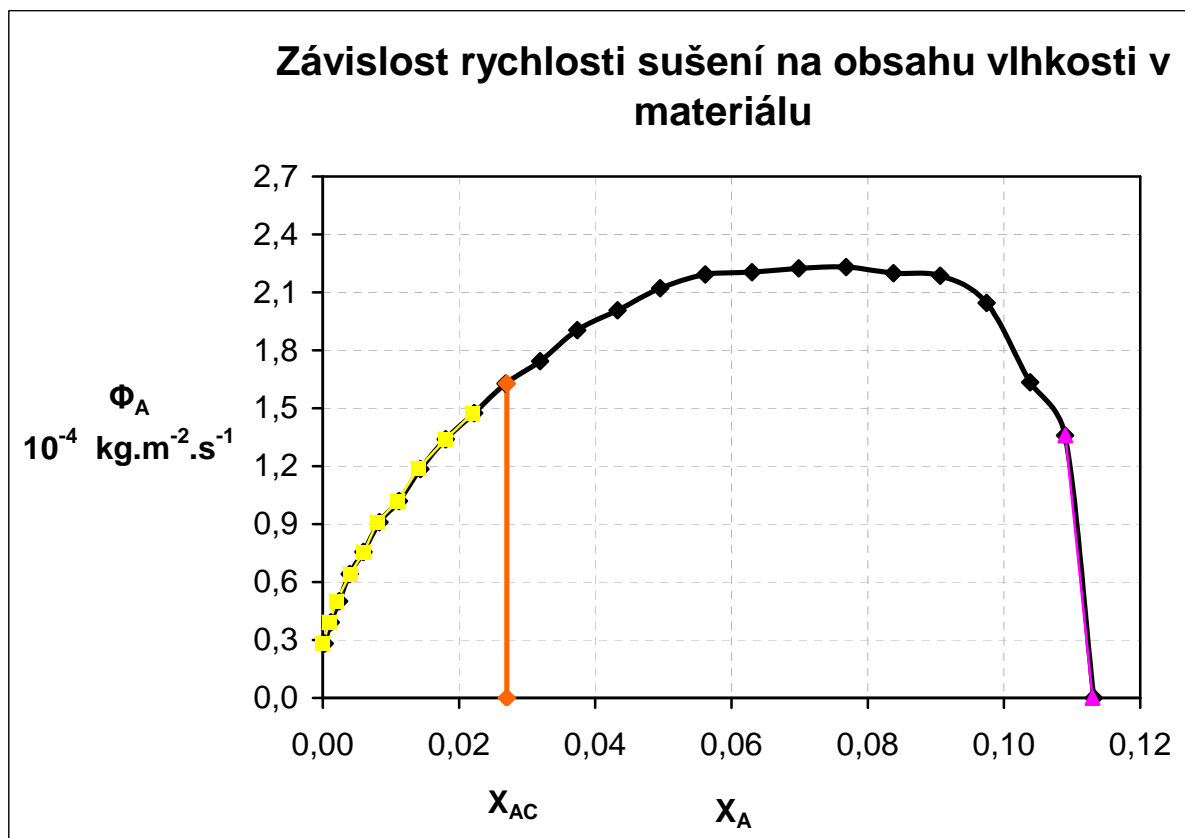
$$\phi_{A1} = \frac{\Delta m_{A1}}{A \cdot (\tau_2 - \tau_1)} = \frac{0,00212}{0,052 \cdot 300} = \underline{\underline{1,359 \cdot 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}}}$$

Z těchto hodnot byl sestrojen Graf 2: Závislost rychlosti sušení na obsahu vlhkosti v materiálu, $\phi_A = f(X_A)$ **celého období sušení**, kde vyznačená hodnota je kritická vlhkost X_{AC} .

Průměrná rychlost sušení v I. období z vypočtených hodnot: $\phi_{AI} = 2,025 \cdot 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$



Graf 1: Závislost obsahu vlhkosti v materiálu na čase.



Graf 2: Závislost rychlosti sušení na obsahu vlhkosti v materiálu.

Cíl 4: Výpočet a porovnání součinitelů přestupu tepla a hmoty v I. období sušení.

Výpočet koeficientu přestupu hmoty k_Y ze vztahu (10):

$$k_Y = \frac{\phi_{AI}}{Y_{Aw} - Y_{A2}} = \frac{2,025 \cdot 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}}{0,0252 - 0,00963} = \underline{\underline{0,013 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}}}$$

Výpočet koeficientu přestupu hmoty k_p ze vztahu (11):

$$k_p = \frac{\phi_{AI}}{p_{Aw} - p_A} = \frac{2,025 \cdot 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}}{3772 \text{ Pa} - 1475 \text{ Pa}} = \underline{\underline{8,814 \cdot 10^{-8} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-1}}}$$

Výpočet součinitele přestupu tepla v I. období sušení α dle vztahu (14):

$$\alpha = \frac{\Delta h_{v,A} \cdot \phi_{AI}}{T_2 - T_w} = \frac{2433527,5 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot 2,025 \cdot 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}}{338,95 \text{ K} - 301,85 \text{ K}} = \underline{\underline{13,280 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}}}$$

$$T_2 = 65,8^\circ\text{C} + 273,15 = 338,95 \text{ K}$$

$$T_w = 28,7^\circ\text{C} + 273,15 = 301,85 \text{ K}$$

Ověření platnosti relace:

$$\alpha = k_Y \cdot C_{pg} = 0,013 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot 1023,767 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} = \underline{\underline{13,486 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}}}$$

Výpočet měrné tepelné kapacity vlhkého vzduchu na kilogram suchého vzduchu C_{pg} (15):

$$C_{pg} = Y_{A2} \cdot c_{pA} + c_{pB} = 0,00963 \cdot 1948,76 + 1005 = \underline{\underline{1023,767 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}}}$$

Cíl 5: Stanovení měrné spotřeby sušícího vzduchu.

Výpočet hustoty vlhkého vzduchu ρ_{vlz} dle vztahů (1) a (2):

$$\rho_{vlz} = \frac{p_b}{287 \cdot T_{lab}} \left(1 - \frac{0,378 \cdot \phi_{lab} \cdot p_v''}{p_b} \right) = \frac{96735 \text{ Pa}}{287 \cdot 299,75 \text{ K}} \left(1 - \frac{0,378 \cdot 0,239 \cdot 3483,860 \text{ Pa}}{96735 \text{ Pa}} \right) = \underline{\underline{1,121 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}}}$$

$$l_n p_v'' = 23,58 - \frac{4044,2}{235,6 + t_{lab}} = 23,58 - \frac{4044,2}{235,6 + 26,6^\circ\text{C}} = 8,156 \text{ Pa}$$

$$p_v'' = \underline{\underline{3483,860 \text{ Pa}}}$$

$$t_{lab} = t_1 = 26,6^\circ\text{C}$$

$$T_{lab} = T_1 = 26,6^\circ\text{C} + 273,15 = 299,75 \text{ K}$$

$$\phi_{lab} = \phi_1 = 23,9\% = 0,239 [-]$$

$$p_b = 96735 \text{ Pa}$$

Výpočet spotřeby sušícího vzduchu za I. období m_{BI} dle vztahu (19):

$$m_{BI} = \frac{\dot{V} \cdot \tau}{v \cdot (1 + Y_{A1})} = \frac{114 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \left(\frac{3600}{3600} \right) \text{ h}}{\frac{1}{1,121} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot (1 + 0,005)} = \underline{\underline{127,158 \text{ kg}}}$$

\dot{V} – objemový průtok vzduchu [$\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$]

τ – doba trvání I. období [h]

v – měrný objem sušícího vzduchu [$\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$]

$$v = \frac{1}{\rho_{v/vz}} = \frac{1}{1,121} \text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$$

Výpočet měrné spotřeby sušícího vzduchu l dle vztahu (20):

$$l = \frac{m_{BI}}{m_{AI}} = \frac{127,158 \text{kg}}{0,0379 \text{kg}} = \underline{\underline{3354,956 [-]}}$$

Hmotnost odpařené vody m_{AI} (21):

$$m_{AI} = A \cdot \phi_{AI} \cdot \tau = 0,052 \text{m}^2 \cdot 2,025 \cdot 10^{-4} \text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot 3600 \text{s} = \underline{\underline{0,0379 \text{kg}}}$$

Cíl 6: Stanovení spotřeby tepla v I. období sušení.

Výpočet spotřeby tepla elektrickým topením Q_T dle vztahu (22):

$$Q_T = (I_2 - I_1) \cdot m_{BI} = (91404 \text{J} \cdot \text{kg}^{-1} - 39501 \text{J} \cdot \text{kg}^{-1}) \cdot 127,158 \text{kg} = \underline{\underline{6599882 \text{J}}}$$

Výpočet spotřeby tepla k odpaření vody Q_I dle vztahu (23):

$$Q_I = \Delta h_{v,A} \cdot m_{AI} = 2433527,5 \text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot 0,0379 \text{kg} = \underline{\underline{92234 \text{J}}}$$

Skutečná spotřeba tepla Q_{SK} :

$$Q_{SK} = 64400 \text{Wh} - 62200 \text{Wh} = 2200 \text{Wh} = 2200 \text{J} \cdot \text{s}^{-1} \cdot 3600 \text{s} = \underline{\underline{7920000 \text{J}}}$$

Cíl 7: Zjištění tepelné účinnosti sušárny v I. období sušení (teoretické i praktické účinnosti).

Výpočet tepelné účinnosti sušárny – z měrných entalpií – teoretická η_1 dle vztahu (24):

$$\eta_1 = \frac{Q_I}{Q_T} = \frac{92234 \text{J}}{6599882 \text{J}} \cdot 100 = \underline{\underline{1,4\%}}$$

Výpočet tepelné účinnosti sušárny – ze spotřebované energie odečtené z elektroměru - praktická η_2 dle vztahu (25):

$$\eta_2 = \frac{Q_I}{Q_{SK}} = \frac{92234 \text{J}}{7920000 \text{J}} \cdot 100 = \underline{\underline{1,2\%}}$$

Kontrola naměřených hodnot měrné entalpie výpočtem I dle vztahu (3):

$$I_1 = 1,006 \cdot t_1 + (2501 + 1,775 \cdot t_1) \cdot Y_{A1} = \underline{\underline{39501 \text{J} \cdot \text{kg}^{-1}}}$$

$$t_1 = 26,6^\circ \text{C}$$

$$Y_{A1} = 0,005 [-]$$

$$I_2 = 1,006 \cdot t_2 + (2501 + 1,775 \cdot t_2) \cdot Y_{A2} = \underline{\underline{91404 \text{J} \cdot \text{kg}^{-1}}}$$

$$t_2 = 65,8^\circ \text{C}$$

$$Y_{A2} = 0,00963 [-]$$

Kontrola naměřených hodnot relativního hmotnostního zlomku vody ve vzduchu Y_{AW} (7):

$$Y_{AW} = \frac{Y_{A2} (2501 + 1,775 \cdot t_2 - 4,186 \cdot t_w) + 1,006 (t_2 - t_w)}{2501 - 2,411 \cdot t_w} [-]$$

$$Y_{AW} = \frac{0,00963 (2501 + 1,775 \cdot 65,8^\circ\text{C} - 4,186 \cdot 28,7^\circ\text{C}) + 1,006 (65,8^\circ\text{C} - 28,7^\circ\text{C})}{2501 - 2,411 \cdot 28,7^\circ\text{C}} = \underline{\underline{0,0252 [-]}}$$

Kontrola naměřených hodnot parciálního tlaku vodní páry p_A dle vztahu (5) a (6):

$$p_A = \frac{Y_{A2} \cdot p_b}{(0,622 + Y_{A2})} = \frac{0,00963 \cdot 96735 \text{ Pa}}{(0,622 + 0,00963)} = \underline{\underline{1475 \text{ Pa}}}$$

$$p_{AW} = \frac{Y_{AW} \cdot p_b}{(0,622 + Y_{AW})} = \frac{0,0252 \cdot 96735 \text{ Pa}}{(0,622 + 0,0252)} = \underline{\underline{3772 \text{ Pa}}}$$

Závěr

Výsledné hodnoty byly počítány pomocí programu MS Excel, proto se mohou mírně lišit od případného přepočítání na kalkulačce.

Tabulka 3: Vypočtené hodnoty.

Směrnice rychlosti v I.období	2	10^{-5} s^{-1}
Průměrná rychlost v I. období Φ_{AI}	2,025	$10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$
Kritická vlhkost X_{AC}	0,027	[-]
Doba trvání I.období τ	3600	s
Koeficient přestupu hmoty k_Y	0,013	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$
Koeficient přestupu hmoty k_p	8,814	$10^{-8} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-1}$
Součinitel přestupu tepla α	13,280	$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$
Součinitel přestupu tepla α (z relace)	13,486	$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$
Hustota vlhkého vzduchu ρ_{vlz}	1,121	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$
Hmotnost suchého vzduchu m_{BI}	127,158	kg
Hmotnost odpařené vody m_{AI}	0,0379	kg
Měrná spotřeba vzduchu l	3354,956	[-]
Q_I	92234	J
O_T	6599882	J
Q_{sk}	7920000	J
η_1	1,4	%
η_2	1,2	%

Tabulka 3: hodnoty nalezené (přepočítané) z Entalpického diagramu, Chemicko-inženýrských tabulek a naměřených hodnot.

Y_{A2}	0,00963	[-]
p_A	1475	Pa
Y_{Aw}	0,0252	[-]
p_{Aw}	3772	Pa
t_w	28,7	°C
t_D	13,8	°C
$\Delta h_{lv,A}$	2433527,5	J.kg ⁻¹
c_{pA}	1948,76	J.kg ⁻¹ K ⁻¹
c_{pB}	1005	J.kg ⁻¹ K ⁻¹
C_{pg}	1023,767	J.kg ⁻¹ K ⁻¹
I_1	39501	J.kg ⁻¹
I_2	91404	J.kg ⁻¹
t_1	26,6	°C
t_2	65,8	°C
φ_1	23,9	%
φ_2	6,2	%

		Teploty [°C]			Relativní vlhkost [%]								
		Před kaloriferem	Za kaloriferem	V sušárně	Před kaloriferem	Za kaloriferem	Údaj na váze [g]	Spotřebovaná energie [kWh]	Hmotnost odpařené vody [kg]	Úbytek vody [kg]	Obsah vody v materiálu [kg]	Relativní hmot. zlomek vlhkosti [-]	Rychlost sušení [10 ⁻⁴ kg/m ² s]
Č.	τ [s]	t ₁	t ₂	t ₃	φ ₁	φ ₂	m	E	m _{ov}	Δm _A	m _A	X _A	Φ _A
1	0	26,2	69,5	85,4	24,5	5,9	903,37	61,8	0,000	0,000	0,057	0,113	0,000
2	300	26,2	65,7	85,3	24,5	6,2	901,25	62,0	0,002	0,002	0,054	0,109	1,359
3	600	26,3	65,9	85,0	24,4	6,2	898,70	62,2	0,005	0,003	0,052	0,104	1,635
4	900	26,4	65,6	84,9	24,1	6,2	895,51	62,4	0,008	0,003	0,049	0,097	2,045
5	1200	26,4	65,9	85,2	24,1	6,3	892,10	62,5	0,011	0,003	0,045	0,091	2,186
6	1500	26,5	65,6	84,9	24,1	6,3	888,67	62,7	0,015	0,003	0,042	0,084	2,199
7	1800	26,6	65,8	85,3	24,0	6,2	885,19	62,9	0,018	0,003	0,038	0,077	2,231
8	2100	26,6	65,9	85,1	24,1	6,2	881,72	63,1	0,022	0,003	0,035	0,070	2,224
9	2400	26,7	65,8	85,2	23,8	6,3	878,28	63,3	0,025	0,003	0,032	0,063	2,205
10	2700	26,7	65,8	85,0	23,8	6,3	874,86	63,5	0,029	0,003	0,028	0,056	2,192
11	3000	26,7	65,5	84,8	23,9	6,2	871,55	63,6	0,032	0,003	0,025	0,050	2,122
12	3300	26,8	65,8	84,9	23,8	6,2	868,42	63,8	0,035	0,003	0,022	0,043	2,006
13	3600	26,8	65,9	84,9	23,7	6,2	865,45	64,0	0,038	0,003	0,019	0,037	1,904
14	3900	26,9	66,0	85,0	23,6	6,1	862,73	64,2	0,041	0,003	0,016	0,032	1,744
15	4200	26,9	65,9	85,0	23,6	6,1	860,19	64,4	0,043	0,003	0,013	0,027	1,628
16	4500	27,0	66,5	84,8	23,5	6,1	857,89	64,5	0,045	0,002	0,011	0,022	1,474
17	4800	27,0	65,8	84,9	23,8	6,2	855,80	64,7	0,048	0,002	0,009	0,018	1,340
18	5100	27,1	66,3	85,1	23,8	6,0	853,95	64,9	0,049	0,002	0,007	0,014	1,186
19	5400	27,2	66,3	84,9	23,8	6,1	852,36	65,1	0,051	0,002	0,006	0,011	1,019
20	5700	27,3	66,2	85,0	23,8	6,1	850,94	65,3	0,052	0,001	0,004	0,008	0,910
21	6000	27,5	66,5	85,0	23,7	6,0	849,76	65,4	0,054	0,001	0,003	0,006	0,756
22	6300	27,5	66,4	84,9	23,6	6,0	848,76	65,6	0,055	0,001	0,002	0,004	0,641
23	6600	27,6	66,8	85,1	23,5	6,0	847,98	65,8	0,055	0,001	0,001	0,002	0,500
24	6900	27,7	66,4	85,1	23,4	6,0	847,37	66,0	0,056	0,001	0,001	0,001	0,391
25	7200	27,9	66,9	85,1	23,3	6,0	846,93	66,1	0,056	0,000	0,000	0,000	0,282
Průměr za I. období		26,6	65,8	85,0	23,9	6,2							2,025

Příloha II: Vypracovaný vzorový protokol – Filtrace

VŠB-TU Ostrava, Katedra Fyzikální chemie		
Jméno: Julie Kadurová	<u>DIPLOMOVÁ PRÁCE</u>	Úloha číslo: 20
Datum měření: 29.03.2009	Název úlohy: Filtrace na komorovém kalolisu	Školní rok: 2009/2010
		Skupina: HN1CHI02

Podmínky měření

$m_C =$	3	kg	hmotnost suchého materiálu
$\rho_s =$	2200	kg/m ³	hustota suchého materiálu
$V_s =$	100	l	objem suspenze
$n =$	5	ks	počet filtračních koláčů
$S_F =$	0,9	m ²	filtrační plocha
$\Delta p =$	4,00E+05	Pa	konstantní rozdíl tlaků
$N =$	6	ks	počet plachetek

Výpočty

Cíl 1: Sestavit hmotnostní bilance pokusné filtrace.

Výpočet hmotnosti suspenze v nádrži před filtrací m_s^0 dle vztahu (11):

$$m_s^0 = V_s \cdot \rho_s^0 = 0,1 \text{ m}^3 \cdot 1020,951 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} = \underline{\underline{102,095 \text{ kg}}}$$

Stanovení hmotnostní bilance dle rovnice (1), (2):

$$m_s^0 = m_F + m_K + m_Z + m_s'' \text{ [kg]}$$

$$m_s^0 x_s^0 = m_K x_K + m_{sZ} + m_s'' x_s^0 \text{ [kg]}$$

m_s^0 – hmotnost suspenze na počátku [kg]

m_K – hmotnost koláče [kg]

m_s'' – hmotnost suspenze po filtraci [kg]

m_{sZ} – ztráty pevné látky [kg]

x_s^0 – hmotnostní zlomek pevné látky v suspenzi [-]

m_Z – celkové ztráty [kg]

m_F – hmotnost filtrátu [kg]

x_K – hmotnostní zlomek pevné látky v koláči [-]

Výpočet hmotnosti zbylé suspenze m_s'' :

$$m_s'' = \rho_s^0 \cdot V_s'' = 1020,951 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot 0,001 \text{ m}^3 = \underline{\underline{1,021 \text{ kg}}}$$

V_s'' - objem zbylé suspenze [m³]

Cíl 2: Vypočítat celkové ztráty a ztráty pevné látky z bilancí.

Výpočet hmotnosti filtrátu m_F dle rovnice (12):

$$m_F = V_F \cdot \rho_v = 0,089 \text{ m}^3 \cdot 999,37 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} = \underline{\underline{88,944 \text{ kg}}}$$

V_F – objem filtrátu [m³]

Výpočet ztráty pevné látky m_{sZ} dle rovnice (2):

$$m_{sZ} = (m_s^0 \cdot x_s^0) - (m_K \cdot x_K) - (m_s'' \cdot x_s^0)$$

$$m_{sZ} = (102,095 \text{ kg} \cdot 0,039) - (4,02 \text{ kg} \cdot 0,870) - (1,021 \text{ kg} \cdot 0,039)$$

$$m_{sZ} = \underline{\underline{0,418 \text{ kg}}}$$

Výpočet celkové hmotnostní ztráty m_z dle rovnice (1):

$$m_z = m_s^0 - m_F - m_K - m_s'' = 102,095 \text{ kg} - 88,944 \text{ kg} - 4,02 \text{ kg} - 1,021 \text{ kg} = \underline{\underline{8,110 \text{ kg}}}$$

Stanovení hustoty suspenze ρ_s^0 dle rovnice (3):

$$\rho_s^0 = \frac{m_{ps}}{V_{ps}} = \frac{m_{ps} \rho_v}{m_{p1}} = \frac{0,32264 \text{ kg} \cdot 999,37 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}}{0,31582 \text{ kg}} = \underline{\underline{1020,951 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}}}$$

m_{ps} - hmotnost odebraného vzorku suspenze ve zcela naplněné odměrné baňce (250 ml)

m_{p1} - hmotnost vody ve zcela naplněné odměrné baňce (250 ml)

V_{ps} - objem odebraného vzorku suspenze ve zcela naplněné odměrné baňce

ρ_v - hustota vody (teplota vody 13° C)

Stanovení koncentrace suspenze x_s^0 dle rovnice (4):

$$\frac{1}{\rho_s^0} = \frac{x_s^0}{\rho_s} + \frac{1-x_s^0}{\rho_v}$$

$$\frac{1}{1020,951 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}} = \frac{x_s^0}{2200 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}} + \frac{1-x_s^0}{999,37 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}}$$

$$x_s^0 = \underline{\underline{0,039[-]}}$$

ρ_s - hustota suché tuhé látky (2200 kg.m⁻³)

Stanovení hustoty filtračního koláče ρ_k dle rovnice (7):

$$V_{p1} = \frac{m_{pc} - m_{pk}}{\rho_v} = \frac{1,1356 \text{ kg} - 0,287 \text{ kg}}{999,37 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}} = \underline{\underline{8,491 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3}}$$

$$V_{pk} = V_p - V_{p1} = 0,001 \text{ m}^3 - 8,491 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3 = \underline{\underline{1,509 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3}}$$

V_{p1} - objem vody potřebný na doplnění Erlenmayerovy baňky (1000 ml) se souborným vzorkem koláče

V_{pk} - objem odebraného souborného vzorku koláče

m_{pc} - hmotnost odebraného souborného vzorku koláče s doplněnou vodou po rysku Erlenmayerovy baňky (1000 ml)

m_{pk} - hmotnost odebraného souborného vzorku koláče

$$\rho_k = \frac{m_{pk}}{V_{pk}} = \frac{0,287 \text{ kg}}{1,509 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3} = \underline{\underline{1902,362 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}}}$$

Stanovení koncentrace filtračního koláče x_k dle rovnice (8):

$$\frac{1}{\rho_k} = \frac{x_k}{\rho_s} + \frac{1-x_k}{\rho_v}$$

$$\frac{1}{1902,362 \text{ kg.m}^{-3}} = \frac{x_k}{2200 \text{ kg.m}^{-3}} + \frac{1-x_k}{999,37 \text{ kg.m}^{-3}}$$

$$x_k = \underline{\underline{0,870[-]}}$$

Cíl 3: Zjistit vlhkost filtračního koláče.

Výpočet vlhkosti filtračního koláče x_{lk} dle rovnice (13):

$$x_{lk} = 1 - x_k = 1 - 0,870 = \underline{\underline{0,130[-]}}$$

Výpočet objemu filtračního koláče V_k dle rovnice (14):

$$V_k = \frac{m_k}{\rho_k} = \frac{4,02 \text{ kg}}{1902,362 \text{ kg.m}^{-3}} = \underline{\underline{0,00211 \text{ m}^3}}$$

Stanovení filtrační plochy S_F dle rovnice (9):

$$S_F = 2.a.b.n$$

avýška filtrační desky
 $S_F = 2.0,3 \text{ m}.0,3 \text{ m}.5$ bšířka filtrační desky
 $S_F = \underline{\underline{0,9 \text{ m}^2}}$ npočet koláčů

Stanovení tloušťky koláče L dle rovnice (10):

$$L = \frac{m_k}{\rho_k.S_F.n} = \frac{4,02 \text{ kg}}{1902,362 \text{ kg.m}^{-3}.0,9 \text{ m}^2.5} = \underline{\underline{4,696.10^{-4} \text{ m}}}$$

m_K - hmotnost koláče

n - počet filtračních koláčů

Výpočet porozity filtračního koláče ε_k dle rovnice (15):

$$\varepsilon_k = \frac{1}{1 + \left(\frac{x_k}{1-x_k} \right) \cdot \left(\frac{\rho_v}{\rho_s} \right)} = \frac{1}{1 + \left(\frac{0,870}{1-0,870} \right) \cdot \left(\frac{999,37 \text{ kg.m}^{-3}}{2200 \text{ kg.m}^{-3}} \right)} = \underline{\underline{0,248[-]}}$$

Cíl 4: Sestrojit graf dle rovnice filtrace, kde nezávisle proměnná je q_F a závislá proměnná τ_F .

Pro filtraci za konstantního tlakového rozdílu byla odvozena rovnice (21):

$$\frac{1}{S_F} \frac{dV_F}{d\tau_F} = \frac{\Delta p}{\beta.\eta \frac{V_F}{S_F} + R_k}$$

Integrací za konstantního tlakového rozdílu (28):

$$\underline{\underline{q_F^2 + 2q_M.q_F - 2K_F.\tau_F = 0}}$$

V_F - objem filtrátu získaný za dobu filtrace [m^3]

V_K - objem koláče [m^3]

τ_F - doba filtrace [s]

S_F - filtrační plocha [m^2]

q_F - průtok filtrátu filtrační plochou [m]

Δp - tlakový rozdíl [Pa]

q_M - filtrační konstanta [m]

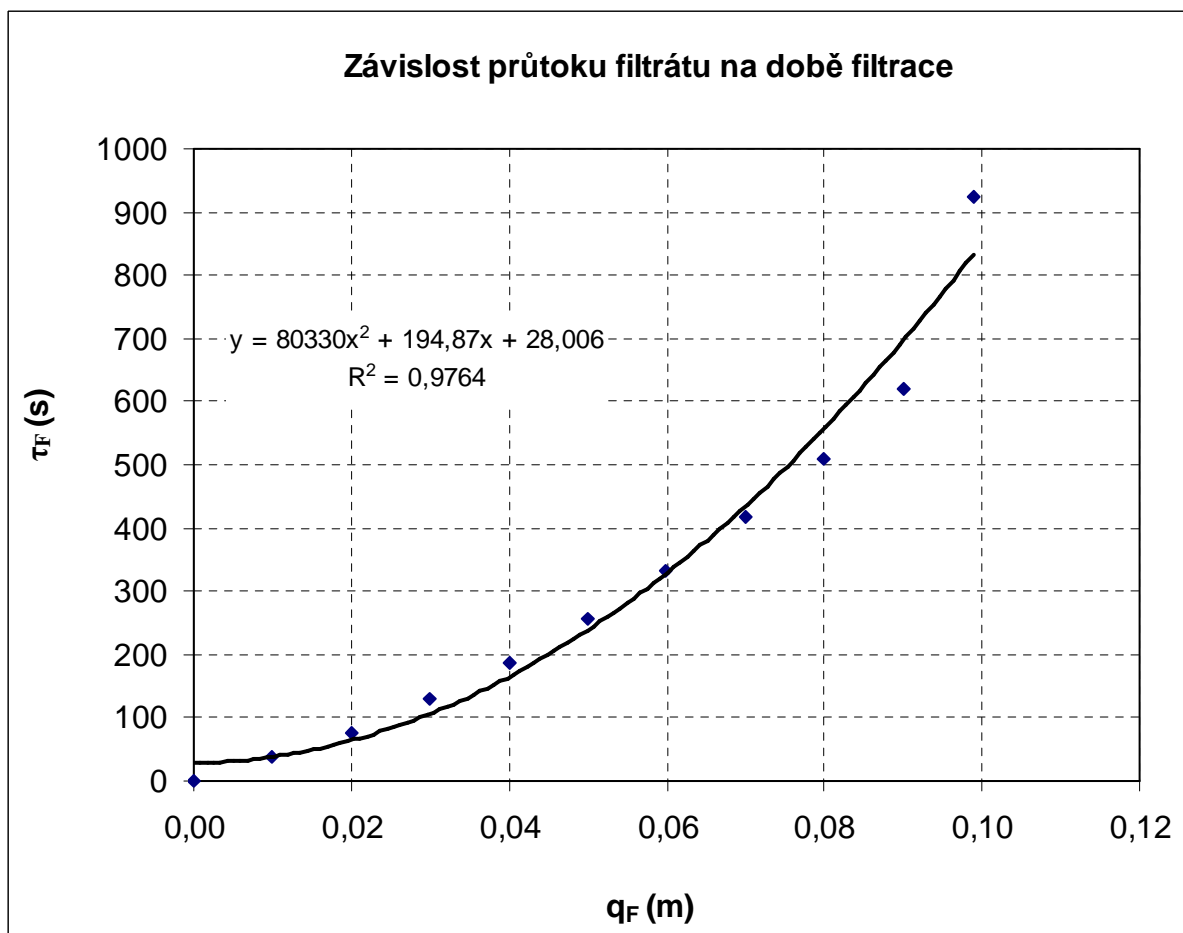
K_F - filtrační konstanta [$m^2 \cdot s^{-1}$]

B - zahrnuje specifickou konstantu [m^{-2}]

α - specifický odpor filtračního koláče [m^{-2}]

R_k - měrný odpor filtračního koláče [$kg \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$]

H - dynamická viskozita filtrátu [Pa.s]



Graf 1: Závislost průtoku filtrátu na době filtrace.

Cíl 5: Stanovit konstanty filtrační rovnice a jejich intervalové odhady z naměřených dat.

Stanovení filtračních konstant K a q_M :

Rovnice regrese: $y = 80330x^2 + 194,87x + 28,006$

$$\tau_F = a_0 + a_1 \cdot q_F + a_2 \cdot q_F^2 \quad (29)$$

$$K_F = \frac{1}{2a_2} = \frac{1}{2 \cdot 80330 s \cdot m^{-2}} = \underline{\underline{6,224 \cdot 10^{-6} m^2 \cdot s^{-1}}} \quad (30)$$

$$q_M = a_1 \cdot K_F = 194,87 s \cdot m^{-1} \cdot 6,224 \cdot 10^{-6} m^2 \cdot s^{-1} = \underline{\underline{1,213 \cdot 10^{-3} m}} \quad (31)$$

Hodnota konstanty a_0 zjištěná regresní analýzou se porovná s výpočtem:

$$a_{02} = -\frac{q_{F2}^2}{2K_F} - \frac{q_{F2} \cdot q_M}{K_F} + \tau_{F2} \quad (32)$$

$$a_{02} = -\frac{(0,010m)^2}{2,6,224 \cdot 10^{-6} m^2 \cdot s^{-1}} - \frac{0,010m \cdot (1,213 \cdot 10^{-3})m}{6,224 \cdot 10^{-6} m^2 \cdot s^{-1}} + 38s = \underline{\underline{28s}}$$

$$a_0 = \frac{\sum_i^n a_{0i}}{n}$$

$$a_0 = \frac{308,085s}{11} = \underline{\underline{28,008s}}$$

Cíl 6: Vypočítat měrný odpor koláče při konstantním tlakovém rozdílu.

Výpočet měrného odporu filtračního koláče α dle rovnice (20):

$$\alpha = \frac{\Delta p \cdot V_F}{K_F \cdot V_K \cdot \eta} = \frac{4 \cdot 10^5 \cdot 0,089}{6,224 \cdot 10^{-6} \cdot 0,00211 \cdot 1,200 \cdot 10^{-3}} = \underline{\underline{1,511 \cdot 10^{16} m^{-2}}}$$

η – viskozita vody při teplotě 13° C

Výpočet odporu filtrační přepážky R dle rovnice (26):

$$R = q_M \cdot \eta \cdot \alpha \frac{V_K}{V_F}$$

$$R = (1,213 \cdot 10^{-3})m \cdot 1,200 \cdot 10^{-3} Pa \cdot s \cdot 1,511 \cdot 10^{16} m^{-2} \frac{0,00211m^3}{0,089m^3}$$

$$R = \underline{\underline{5,223 \cdot 10^8 kg \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}}}$$

Závěr

Výsledné hodnoty byly počítány pomocí programu MS Excel, proto se mohou mírně lišit od případného přepočítání na kalkulačce.

Tabulka 1: Vypočítané hodnoty.

$m_s'' =$	1,021	kg	hmotnost zbylé suspenze
$m_z =$	8,110	kg	celková hmotnostní ztráta
$m_{sz} =$	0,418	kg	ztráta pevné látky
$m_s^0 =$	102,095	kg	hmotnost suspenze v nádrži
$\rho_s^0 =$	1020,951	kg/m ³	hustota suspenze
$V_F =$	89	l	objem filtrátu
$m_F =$	88,944	kg	hmotnost filtrátu
$x_s^0 =$	0,039	[-]	hmotnostní zlomek pevné látky v suspenzi
$x_k =$	0,870	[-]	hmotnostní zlomek pevné látky v koláči
$x_{lk} =$	0,130	[-]	vlhkost koláče
$V_k =$	0,00211	m ³	objem koláče
$m_k =$	4,02	kg	hmotnost koláče
$m_{ps} =$	0,32264	kg	hmotnost odebrané suspenze
$m_{p1} =$	0,31582	kg	hmotnost vody
$\rho_v =$	999,37	kg/m ³	hustota vody
$\eta =$	1,2E-03	Pa.s	dynamická viskozita vody
$\rho_k =$	1902,362	kg/m ³	hustota koláče
$m_{pk} =$	0,287	kg	hmotnost souborného vzorku koláče
$m_{pc} =$	1,1356	kg	hmotnost koláče s doplněnou vodou
$V_{pk} =$	1,509E-04	m ³	objem souborného vzorku koláče
$L =$	4,696E-04	m	tloušťka koláče
$\varepsilon_k =$	0,248	[-]	porozita koláče
$\alpha =$	1,511E+16	m ⁻²	měrný odpor koláče
$K_F =$	6,224E-06	m ² .s ⁻¹	konstanta filtrační rovnice
$q_M =$	11,213E-03	m	konstanta filtrační rovnice
$R =$	5,223E+08	kg.m ⁻² .s ⁻¹	odpor filtrační přepážky

Tabulka 2: Hodnoty pro sestavení grafu.

Č.	Čas [s]	V_F [dm ³]	q_F [m]
1	0	0	0
2	38	9	0,010
3	77	18	0,020
4	129	27	0,030
5	187	36	0,040
6	255	45	0,050
7	332	54	0,060
8	417	63	0,070
9	511	72	0,080
10	620	81	0,090
11	924	89	0,099

